



**Jaime Tiago Almeida  
Araújo**

**Dispositivo de ensaio biaxial de provetes  
cruciformes**

“Learn from yesterday, live for today, hope for tomorrow.”

“The important thing is not to stop questioning”  
Albert Einstein (1879-1955)





**Jaime Tiago Almeida  
Araújo**

**Dispositivo de ensaio biaxial de provetes  
cruciformes**

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestrado Mestre em Engenharia Mecânica, realizada sob orientação científica de António Manuel de Bastos Pereira, Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro e de Alfredo Manuel Balacó de Moraes, Professor Associado do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro.



## **O júri / The jury**

Presidente / President

**Prof. Doutor Prof.<sup>a</sup> Doutora Mónica Sandra Abrantes de Oliveira  
Correia**

Professora Auxiliar da Universidade de Aveiro

Vogais / Committee

**Prof. Doutor Mário Augusto Pires Vaz**

Professor Associado da Faculdade de Engenharia Universidade do Porto

**Prof. Doutor António Manuel de Bastos Pereira**

Professor Auxiliar da Universidade de Aveiro (orientador)



## **Agradecimentos**

Agradeço a todos que tornaram este trabalho possível. Deixo registado um agradecimento especial aos meus pais, sem o seu apoio incondicional em todas as minhas decisões e a sua sabedoria não alcançaria aquilo que hoje me tornei.

À minha irmã, que sempre esteve presente e disponível em todos os momentos da minha vida para me ajudar, aconselhar e nunca me deixar baixar os braços ao longo do todo o meu caminho profissional e pessoal.

Aos meus orientadores Prof. Doutor António Manuel de Bastos Pereira e ao Prof. Doutor Alfredo Manuel Balacó de Moraes pela disponibilidade, dedicação e sugestões sem as quais este trabalho não teria sido possível.

Por fim, sem nunca esquecer as grandes amizades que se formaram durante este percurso académico e após continuarão.





**Palavras-chave**

ensaio; biaxial; vídeo extensómetro; provete; polipropileno; célula; carga

**Resumo**

A presente Dissertação teve por objetivo a finalização e validação de um dispositivo de ensaio biaxial desenvolvido no Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro. Este tipo de ensaio tem adquirido importância crescente, sobretudo para materiais anisotrópicos, como os laminados compósitos, que apresentam um comportamento tensão-deformação particularmente complexo. O trabalho realizado passou inicialmente pela implementação e calibração das células de carga, aplicação de um vídeo-extensómetro à medição das deformações, conceção de peças auxiliares, criação de *software* de recolha de dados e elaboração de procedimentos de ensaio para garantir o rigor dos resultados. Seguidamente, procedeu-se à validação dos sistemas e dos procedimentos desenvolvidos através de ensaios de tração uniaxial em provetes poliméricos, tomando como referência resultados de ensaio efetuados numa máquina universal. Finalmente, realizaram-se ensaios biaxiais de tração-compressão que reforçaram a confiança nos sistemas e procedimentos.



**Keywords**

test; biaxial, video extensometer, specimen, polypropylene, cell, load

**Abstract**

The objective of this thesis was to conclude and validate a biaxial testing machine developed at the Mechanical Engineering Department of The University of Aveiro. Biaxial testing is increasingly important, especially for anisotropic materials such as composite laminates, which have a particularly complex mechanical behavior. the present work involved initially the implementation and calibration of load cells, application of a video-extensometer for strain measurements, design of auxiliary parts, development of raw data gathering software and definition of testing procedures to ensure the accuracy of results. In a second stage, the systems and procedures developed were validated through uniaxial tensile tests on polymer specimens using results obtained in a universal testing machine as benchmarks. Finally, biaxial tensile-compressive test were conducted and the results attained reinforced the confidence in the systems and procedures.



# Conteúdo

<b>1</b>	<b>Estado da Arte</b>	<b>1</b>
1.1	Equadramento . . . . .	1
1.2	Métodos de ensaios biaxial . . . . .	2
1.3	Máquinas de ensaios biaxiais . . . . .	3
1.4	Princípios fundamentais do dispositivo . . . . .	6
<b>2</b>	<b>Objetivos</b>	<b>9</b>
2.1	Ponto de Partida e tarefas a realizar . . . . .	9
<b>3</b>	<b>Procedimentos Iniciais</b>	<b>13</b>
3.1	Calibração das células de carga . . . . .	13
3.2	Vídeo-extensómetro . . . . .	18
3.2.1	Vídeo-extensómetro, <i>software</i> e calibração . . . . .	18
3.2.2	Suporte e instalação . . . . .	20
3.3	Fabrico dos provetes . . . . .	21
3.4	Alterações em componentes mecânicos da máquina . . . . .	22
3.5	Ensaios: preparação e procedimento . . . . .	22
<b>4</b>	<b>Ensaios Experimentais</b>	<b>25</b>
4.1	Tratamento de dados . . . . .	25
4.2	Ensaios uniaxiais de validação do dispositivo . . . . .	25
4.3	Ensaios biaxiais . . . . .	32
<b>5</b>	<b>Conclusões e Trabalhos futuros</b>	<b>35</b>
<b>A</b>	<b>Anexos A</b>	<b>37</b>
<b>B</b>	<b>Anexos B</b>	<b>39</b>



# Lista de Tabelas

3.1	Condições de processamento polipropilento . . . . .	22
-----	-----------------------------------------------------	----





# Lista de Figuras

1.1	Hélice para uma turbina eólica . . . . .	2
1.2	Dispositivo de Ensaio Multi-axiais da <i>CABER</i> . . . . .	3
1.3	Provetes cruciformes sujeitos a dois ou quatro atuadores . . . . .	4
1.4	Atuamento de forças num provete cruciforme . . . . .	4
1.5	Dispositivo com servocontrolo em malha fechada . . . . .	5
1.6	Comparação de projetos de máquinas de ensaios biaxiais . . . . .	6
1.7	Campo de visão do vídeo extensómetro aplicado na máquina biaxial . . . . .	7
2.1	Representação esquemática do dispositivo construído no DEM-UA . . . . .	9
2.2	Montagem global e identificação dos principais componentes . . . . .	10
2.3	Rolamento a atuar sobre a cunha . . . . .	11
2.4	Sistema de fixação dos provetes . . . . .	11
3.1	Ponte de Wheatstone . . . . .	13
3.2	Ficha existente no hardware Spider 8 . . . . .	14
3.3	Ligação da Ponte de Wheatstone e o conector DA-15 . . . . .	14
3.4	Ligações da ficha DA-15 e Célula de Carga . . . . .	15
3.5	Exemplo dos resultados do ensaio obtidos no “catman 4.5” . . . . .	15
3.6	Calibração das células de carga . . . . .	16
3.7	Fluxograma da ligação entre dispositivos do sistema de leitura de carga . . . . .	17
3.8	Vídeo-extensómetro MESSPHYSIK ME 46NG . . . . .	18
3.9	Lente, ampliador e vídeo-extensómetro . . . . .	18
3.10	Matriz de calibração, provete de calibração e microscópio . . . . .	19
3.11	Fluxograma de calibração . . . . .	19
3.12	Placa de elevação do vídeo-extensómetro . . . . .	20
3.13	Montagem da interface vídeo-extensómetro máquina . . . . .	21
3.14	Exemplar dos provetes utilizados e desenho com as dimensões gerais . . . . .	21
3.15	Sistema cruciforme móvel . . . . .	23
3.16	projetado . . . . .	23
3.17	Fluxograma de procedimento de um ensaio experimental . . . . .	24
4.1	Tratamento de dados . . . . .	26
4.2	Distância entre pontos $L_0=5\text{mm}$ . . . . .	26
4.3	Curvas tensão-deformação medidas em ensaios de tração . . . . .	28
4.4	Comparação de todas as curvas tensão-deformação da Figura 4.3 . . . . .	29
4.5	Curvas deformação no eixo livre-deformação eixo tracionado . . . . .	30
4.6	Comparação de todas as curvas deformação no eixo livre - deformação no eixo tracionado . . . . .	31
4.7	Curvas tensão-deformação de provetes sujeitos a ensaio biaxial . . . . .	33

4.8	Fotografias de provetes sujeitos a ensaios biaxiais . . . . .	34
A.1	Informação técnica da célula de carga cedida pelo fabricante . . . . .	37
A.2	Gráfico do ensaio biaxial tração/compressão retirado do “Catman 4.5” . .	38
A.3	Exemplo dos 4 pontos colocados no provete para um ensaio . . . . .	38
B.1	Identificação e montagem dos componentes do sistema de compressão . .	40
B.2	Peça do sistema de compressão que contacta com o provete . . . . .	41
B.3	Placa superior do sistema de compressão do braço com célula de carga . .	42
B.4	Placa superior do sistema de compressão do braço sem célula de carga . .	43
B.5	Placa inferior do sistema de compressão . . . . .	44

# Capítulo 1

## Estado da Arte

### 1.1 Equadramento

As exigências crescentes de competitividade económica e disponibilidade de ferramentas de projeto de maior capacidade têm vindo a reduzir as margens de segurança no projeto. Para isso é também fundamental um melhor conhecimento do comportamento mecânico dos materiais, sobretudo dos materiais estruturais de elevado desempenho, como os laminados compósitos, cada vez mais usados em aplicações estruturais (Figura 1.1). De facto, estes materiais são acentuadamente anisotrópicos e a sua caracterização exige vários ensaios uniaxiais [1]. Todavia, conforme revelou um estudo internacional recente analisado [1], a previsão da rotura exige a realização de ensaios multiaxiais, que coloca dificuldades acrescidas quando relacionados com os ensaios uniaxiais. Por estas razões pode-se afirmar que os ensaios multiaxiais têm-se tornado cada vez mais relevantes nas indústrias nos últimos anos.

Este trabalho aborda os ensaios biaxiais, que, como o nome sugere, consistem na aplicação de um estado biaxial na amostra. Na maioria dos casos, trata-se de gerar tensões normais perpendiculares em provetes cruciformes. Os equipamentos disponíveis para a realização destes ensaios são normalmente máquinas servo-hidráulicas de custos elevados. No DEM-UA foi desenvolvido recentemente uma máquina muito menos dispendiosa que permite a realização deste mesmo tipo de ensaios. Os objetivos principais deste trabalho passavam por completar a máquina de modo a torná-la operacional, bem como realizar alguns ensaios de validação dos sistemas em material polimérico.

Os dispositivos biaxiais têm de possuir transdutores que permitam medir forças e deformações no provete. As forças são medidas pelas chamadas células de carga, enquanto que as deformações podem ser medidas por extensómetros de resistência elétrica, vídeo-extensómetro ou outros sistemas [2], [3]. A adaptação destes transdutores ao dispositivo biaxial em questão mereceu atenção especial neste trabalho.



Figura 1.1: Hélice para uma turbina eólica [4]

## 1.2 Métodos de ensaios biaxial

Os métodos de ensaios que produzem estados de tensão multi-axiais podem ser divididos em duas categorias distintas:

- i. Ensaios que utilizam um sistema único de aplicação de força;
- ii. Ensaios que utilizam dois ou mais sistemas de aplicação de força independentes.

Na primeira categoria (i) a relação de tensão biaxial criada depende diretamente da geometria do provete ou da configuração da carga e fixação. Alguns exemplos deste tipo de testes são ensaios de flexão e ensaios de formação de convexidade por pressão óleo [5], [6]. Nestes últimos, a curvatura criada em direções opostas permite avaliar o comportamento biaxial do material à tração-compressão. Neste grupo inserem-se também ensaios uniaxiais de provetes compósitos com as fibras orientadas numa orientação oblíqua relativamente à de carregamento [5], [6]. Nestes ensaios gera-se um estado de tensão complexo, função do ângulo entre a direção das fibras e a da carga.

Nos ensaios da segunda categoria (ii) são normalmente aplicadas cargas segundo dois eixos para criar um estado de tensão biaxial. Os métodos mais representativos envolvem a aplicação de [5]:

- cargas de tração ou compressão combinadas com torção;
- pressão no interior ou no exterior de um elemento tubular de paredes finas sujeito à torção;
- cargas axiais perpendiculares em provetes cruciformes.

A segunda das técnicas acima referida é uma das mais populares [6]. Não obstante, existe sempre um gradiente de tensões através da espessura, assim como outros inconvenientes [6], tais como:

- suscetibilidade a fenómenos de instabilidade;

- variações de geometria durante a aplicação da carga que dificultam a análise dos dados;
- Representatividade da forma tubular para outras formas, por exemplo, chapa.

Por estas razões tem havido um interesse crescente num ensaio de provetes cruciformes com aplicação de cargas segundo direções perpendiculares. Ainda assim, merece referência o ensaio multi-axial da CABER (*Centre for Applied Biomedical Engineering Research*) que consiste num dispositivo com 16 pontos de solicitação (Figura 1.2) aplicado a gels e polímeros [2].

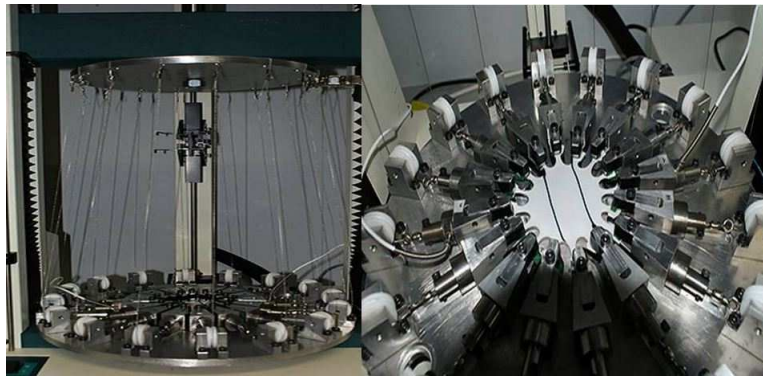


Figura 1.2: Dispositivo de Ensaio Multi-axiais da CABER [2]

A ideia da utilização dos provetes cruciformes apareceu, em conjunto com os primeiros dispositivos, nos anos mil novecentos e sessenta, conforme se detalha no capítulo 1.3. O desenho do provete tem sido objeto de muita discussão, pois possui zonas de concentrações de tensões que poderão causar roturas prematuras, inviabilizando a caracterização do material. Há basicamente dois modos de transmitir cargas para o provete. O primeiro passa pela aplicação de apenas um atuador por direção, o que implica um deslocamento do centro do provete, como ilustra a Figura 1.3b. Por seu turno, com quatro atuadores, dois em cada direção e com sentidos opostos de deslocamento, o centro do provete permanece idealmente imóvel, como é demonstrado nas Figuras 1.3a e 1.4a. Na realidade, porém, o centro do provete pode deslocar-se conforme a representação da Figura 1.4b, o que vai provocar desigualdade das forças  $P$  e  $P'$ . Isto complica consideravelmente o tratamento de dados. De modo a prever a existência deste deslocamento e quais as diferenças entre forças, a solução passaria pela aplicação de quatro células de carga, duas por eixo nas direções dos deslocamentos, células estas que forneceriam um sinal de controlo. Para além de complicar o ensaio, esta solução necessitaria que a diferença entre as cargas fosse suficiente para o sinal de controlo ser eficaz, ou seja, pelo menos  $10kN$  segundo [6].

### 1.3 Máquinas de ensaios biaxiais

Apesar do interesse crescente em torno dos ensaios multi-axiais ser recente, os projetos das máquinas datam de há alguns anos. Shiratori e Ikegame [7] apresentaram em 1967 um dispositivo que utilizava atuadores hidráulicos para a aplicação das cargas. Também

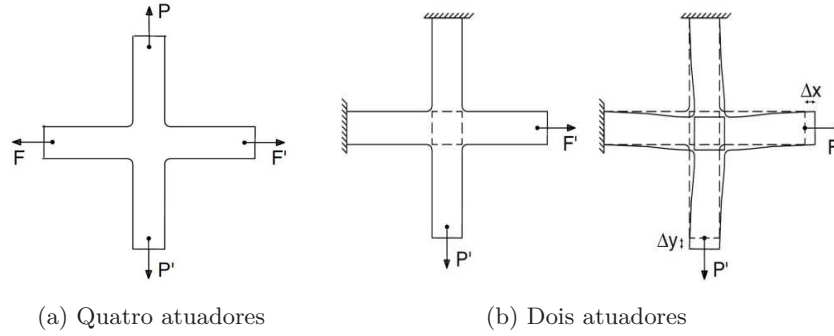


Figura 1.3: Provete cruciforme sujeito a dois ou quatro atuadores [6]

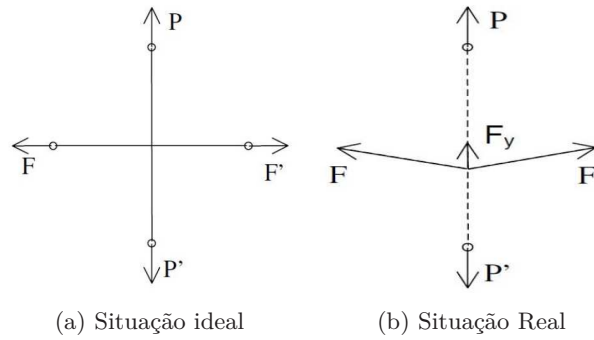


Figura 1.4: Atuamento de forças num provete cruciforme [6]

Pascoe e Villiers [8] usaram este princípio onde, a um provete cruciforme eram diretamente aplicados  $200kN$  de força quer em compressão quer em tração. Já Parsons e Pascoe [9], para poderem realizar estes testes a qualquer taxa de tensões, equiparam os dispositivos originais com servo-controlos em malha fechada usando as tensões e as cargas resultantes como sinais de retorno (Figura 1.5). Por sua vez, Makinde desenvolveu uma máquina semelhante [10], representada na Figura 1.6a, que pode ser dividida em duas secções principais: o sistema de carga e o sistema de controlo. Pelas razões acima referidas, Makinde [10] usou dois atuadores hidráulicos lineares em cada direção para assegurar que o centro do provete permaneceria imóvel durante os testes. Os atuadores hidráulicos estariam ligados a linhas comuns para garantir cargas iguais em sentidos opostos. A aplicação de células de carga permite medir forças em ambas as direções ao longo do teste. Este dispositivo tem sido utilizado para ensaios biaxiais de baixas e elevadas cargas nos mais diversos tipos de provetes cruciformes.

Mais tarde, um novo desenho para uma máquina de ensaios biaxiais foi apresentado por Boehler [11]. Esta máquina tinha um princípio de funcionamento que assentava na utilização de quatro parafusos sem-fim atuados em direções opostas segundo ambos os eixos com o mesmo objetivo de manter o centro do provete imóvel. Os parafusos sem-fim eram controlados por dois motores distintos: um motor AC utilizado no posicionamento prévio ao ensaio, e um motor DC usado durante o ensaio. Esta estrutura apresentava uma clara vantagem: o seu corpo vertical permitia acesso por ambos os lados facilitando assim a montagem do provete. A tarefa de colocação de um vídeo-extensómetro ficava

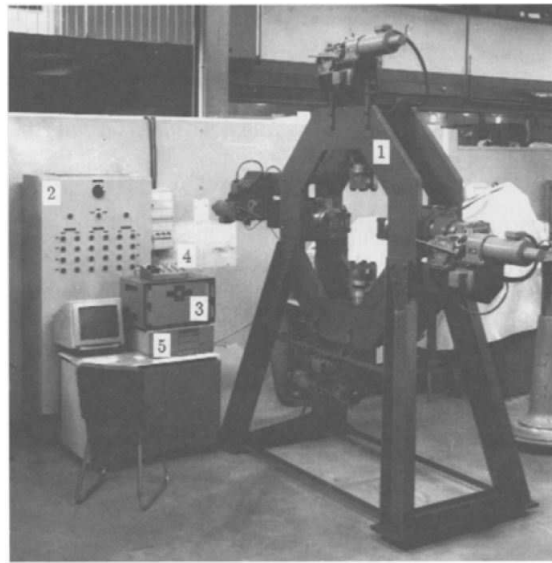


Figura 1.5: Dispositivo com servocontrolo em malha fechada: 1-Estrutura, 2-Unidade de Alimentação, 3-Unidade analog/logic, 4-Painel de Controlo, 5-Unidade do servocontrolo [9]

também facilitada. Contudo, este sistema também apresentava uma clara limitação: o peso morto das pinças horizontais que era necessário ter em consideração.

De modo a clarificar alguns resultados que vinham a ser conseguidos com base nos modelos descritos, em 1998, Kuwabara [12] apresentou um novo modelo de um dispositivo para ensaios biaxiais (Figura 1.6b) que, à semelhança da máquina de Makinde [10] (Figura 1.6a), utilizava quatro atuadores hidráulicos ligados à mesma linha. Contudo, cada linha dos atuadores era controlada independentemente por meio de servo-controladores. Tal como as máquinas apresentadas anteriormente, a principal preocupação residia em manter o centro do provete estático durante o ensaio biaxial. Kuwabara [12] foi bem sucedido neste aspeto devido à conciliação do sistema hidráulico com os servo-controladores e uma ligação em pantógrafo, como se pode verificar na Figura 1.6b [12]. Uma ligação em pantógrafo é constituída por quatro barras articuladas de dimensões diferentes duas a duas, unidas entre si, que se mantêm constantemente paralelas em relação à sua oposta, obrigando no caso presente a que o movimento longitudinal dos eixos permaneça igual em todas as direções.

Ao longo dos últimos os anos [12] foram apresentados dispositivos semelhantes aos acima descritos, que continuam a ser tomadas como referência devido à relativa simplicidade e fiabilidade de resultados. Todavia, trata-se geralmente de máquinas servo-hidráulicas de elevado custo. Daí o interesse numa máquina mais simples e barata como a que foi desenvolvida recentemente no DEM-UA, e cuja finalização é o objetivo deste trabalho.



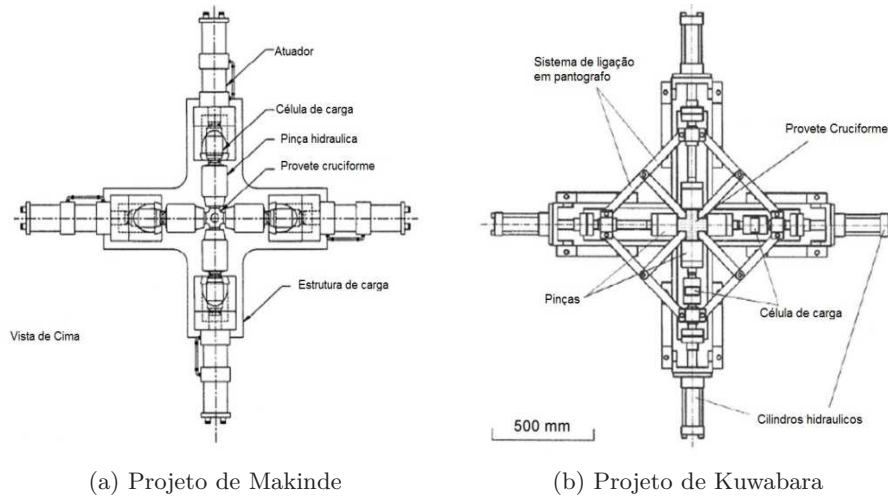


Figura 1.6: Comparação de projetos de máquinas de ensaios biaxiais [12]

## 1.4 Princípios fundamentais do dispositivo

Após a revisão efetuada nas secções anteriores tornou-se mais fácil perceber o contexto e a importância do trabalho que tem vindo a ser desenvolvido em torno do dispositivo de ensaios biaxiais no DEM-UA. Este dispositivo satisfaz alguns princípios fundamentais que contribuem decisivamente para o sucesso dos ensaios. Em primeiro lugar, e à semelhança de projetos já desenvolvidos, este dispositivo não possui uma ligação rígida entre o sistema de aplicação de cargas e o sistema de movimentação do provete. Não obstante, tal como nos dispositivos apresentados por Makinde [10], o centro do provete ficará imóvel ao longo dos ensaios, pois serão impostos deslocamentos simétricos em cada eixo aos pontos de amarração do provete. Em segundo lugar, o dispositivo está dotado de uma célula de carga em cada eixo de solicitação e de um sistema de medição de deformações locais, neste caso um vídeo-extensómetro.

O trabalho de desenvolvimento de sistemas, e finalização dos já existentes é o principal tema em estudo aqui apresentado. A principal aplicação futura deste dispositivo será o ensaio de provetes cruciformes de compósitos reforçados por fibras. Devido à limitação do dispositivo em relação ao campo de visão alcançado pelo vídeo-extensómetro aplicado, como se depreende da Figura 1.7, a montagem mecânica de diversos componentes necessitou de algum desenvolvimento e alterações. Apesar da máquina estar dimensionada para provetes compósitos, pois as deformações sofridas por estes são bastante reduzidas, optou-se pela utilização de provetes de polipropileno para validação do dispositivo, pois trata-se de um material mais uniforme, isotrópico.



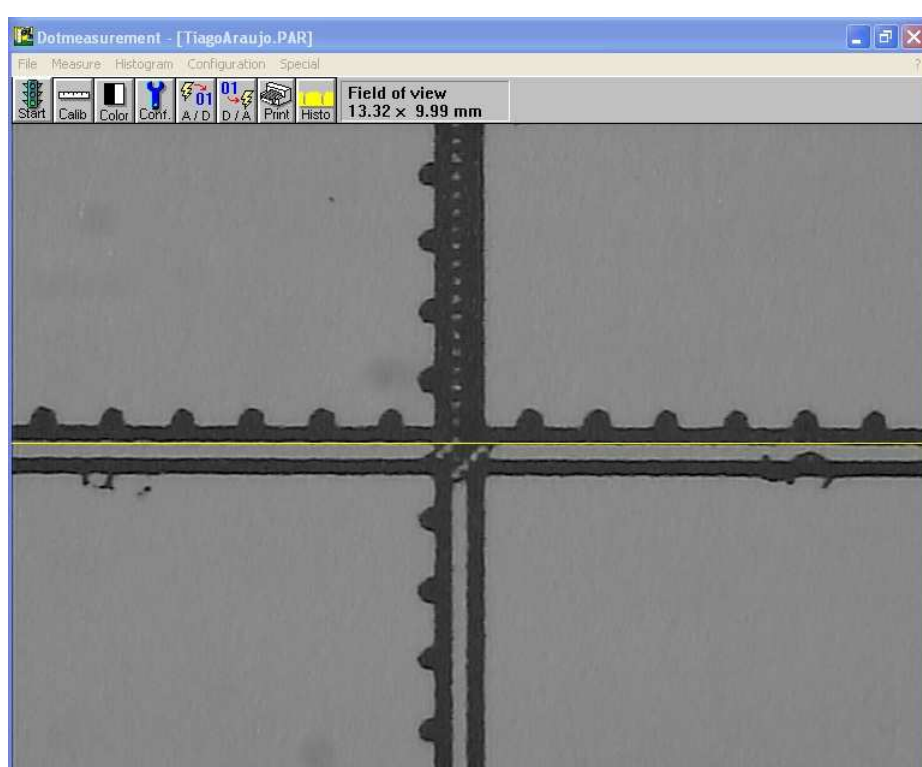


Figura 1.7: Campo de visão do vídeo extensómetro aplicado na máquina biaxial (resolução 1mm).



## Capítulo 2

# Objetivos

### 2.1 Ponto de Partida e tarefas a realizar

A máquina de ensaios biaxiais projetada e construída no DEM-UA consiste basicamente em dois pares de amarras orientados perpendicularmente e com células de carga numa das extremidades (Figura 2.1). As amarras têm cunhas nas extremidades que são atuadas por rolamentos ligados a um bloco rígido cruciforme que, por sua vez, é acionado por um cilindro hidráulico e guiado por quatro veios calibrados. Notar que este sistema de acionamento dos eixos por cunhas garante um movimento simétrico em cada eixo, pelo que é apenas necessária uma célula de carga por eixo.

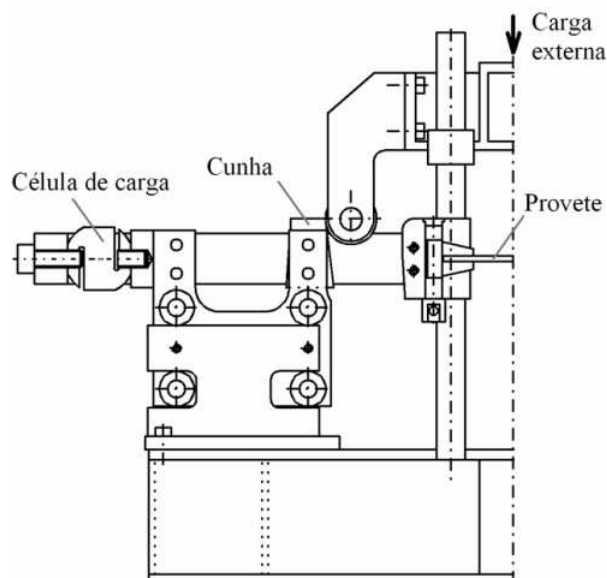


Figura 2.1: Representação esquemática do dispositivo construído no DEM-UA

Alterando a orientação e os ângulos das referidas cunhas é possível obter diferentes combinações de carregamentos tração-tração, tração-compressão ou compressão-compressão.

As figuras 2.2 a 2.4 mostram fotografias da máquina de ensaios e dos seus com-

ponentes principais. Alimentado por uma bomba hidráulica, o cilindro hidráulico de carregamento da máquina está colocado no topo da estrutura, e provoca um movimento vertical sob força constante, pois o controle existente é uma válvula reguladora de caudal de 3 posições de centros fechados atuada manualmente. Note-se que a válvula não está adaptada para os baixos caudais usados, sendo pouco precisa quando é necessário modificar a velocidade do ensaio.

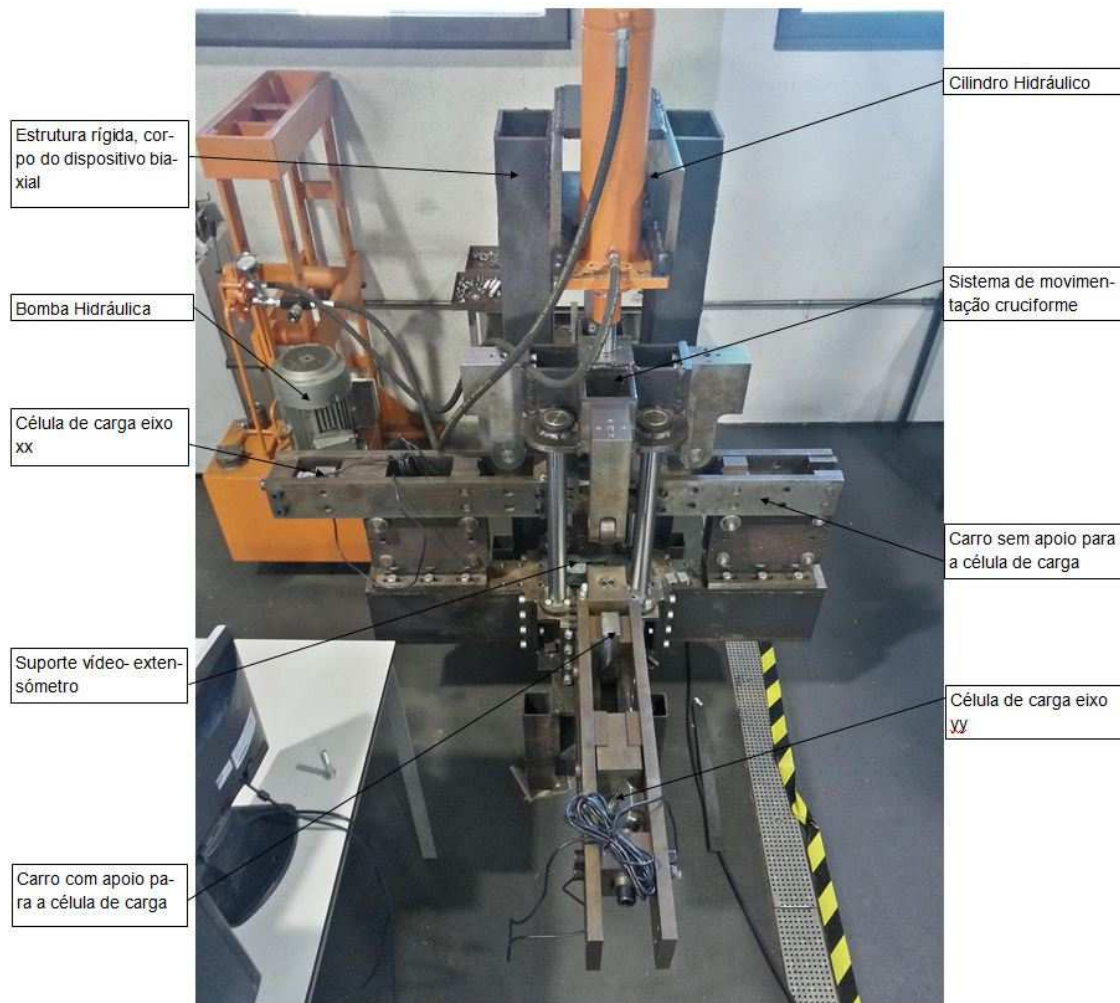


Figura 2.2: Montagem global e identificação dos principais componentes

No início deste trabalho a máquina encontrava-se quase finalizada do ponto de vista mecânico. Contudo, eram necessárias diversas intervenções para a tornar operacional e realizar os ensaios pretendidos:

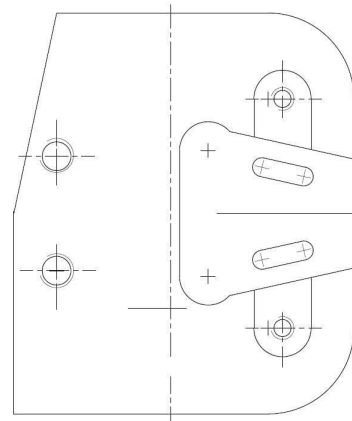
- Estabelecer a comunicação via pc (*Catman 4.5*) com as células de carga em simultâneo, passando pelo amplificador de sinal "*Spider 8*";
- Implementação e calibração das células de carga;



Figura 2.3: Rolamento a atuar sobre a cunha



(a) Amarra na posição de repouso e na posição avançada



(b) Esquema de funcionamento da amarra

Figura 2.4: Sistema de fixação dos provetes

- Aplicação do vídeo-extensómetro, resolvendo as questões de deteção, focagem e estabilidade dos pontos de medição;
- Validação dos eixos, ou seja, provar que existia repetibilidade nos eixos e que estes são “iguais” quer em  $x$  e  $y$ ;
- Flexibilização do sistema em relação à acomodação de provetes de diferentes dimensões;
- Finalização das amarras de tração;
- Projeto e fabrico do sistema de compressão.

A concretização de alguns dos pontos anteriores e a validação do sistema requeria um conjunto de ensaios, e portanto as seguintes tarefas:

- Obtenção de provetes;

- Realização de ensaios uniaxiais de referência na máquina universal de ensaios do DEM-UA, *Shimadzu*;
- Cruzamento de dados entre o programa que controla o vídeo-extensômetro, o “*Dotmeas*”, e o programa que controla as células de carga “*Catman 4.5*”, tendo por base a escala de tempos;
- Cruzamento de dados entre o “*Dotmeas*” e o “*Tensile test*” que controla a *Shimadzu*;
- Obtenção de curvas tensão-deformação uniaxial de referência para um material polimérico;
- Realização de ensaios biaxiais nesse material com uma direção solicitada à tração e outra à compressão.

## Capítulo 3

# Procedimentos Iniciais

### 3.1 Calibração das células de carga

As células de carga têm geralmente quatro extensômetros ligados entre si com a configuração de uma ponte de *Wheatstone* (Figura 3.1). Os desequilíbrios da ponte originados pelas deformações dos extensômetros permitem obter a carga aplicada, depois da célula ter sido devidamente calibrada. A ponte de *Wheatstone* é alimentada por uma tensão em  $V$ , e fornece uma tensão de saída em função da carga em  $mV$ . Esta relação em  $mV/V$  foi medida pelo amplificador de sinal *Spider 8* e pelo *software Catman 4.5*.

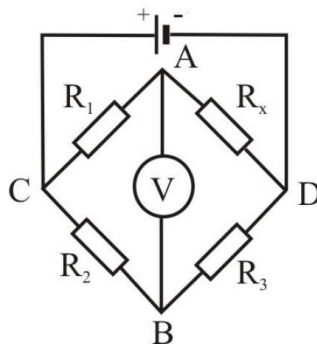


Figura 3.1: Ponte de Wheatstone [3]

O *hardware Spider 8* possui portas DA-15 (Figura 3.2a) de ligação às células de carga. Houve que compatibilizar as portas de quinze pinos do *Spider 8* com as portas de 4 pinos das células de carga, ficando o esquema de ligação conforme a Figura 3.3. No final, procedeu-se às ligações por soldadura a estanho dos fios aos respectivos pinos da ficha (Figura 3.4).

Procedeu-se então ao estudo de uma solução que permitisse a calibração das células de carga em causa. Inicialmente, as células de carga foram ligadas a um dispositivo de ensaios na máquina *Shimadzu* e sujeitas a carregamento monotónico. Porém, este método revelou-se ineficaz para uma boa análise de resultados, pois as curvas obtidas possuíam um início algo curvo (Figura 3.5) e os intervalos de tempo do amplificador de sinal eram muito mais precisos do que os obtidos através da *Shimadzu*, que sofriam

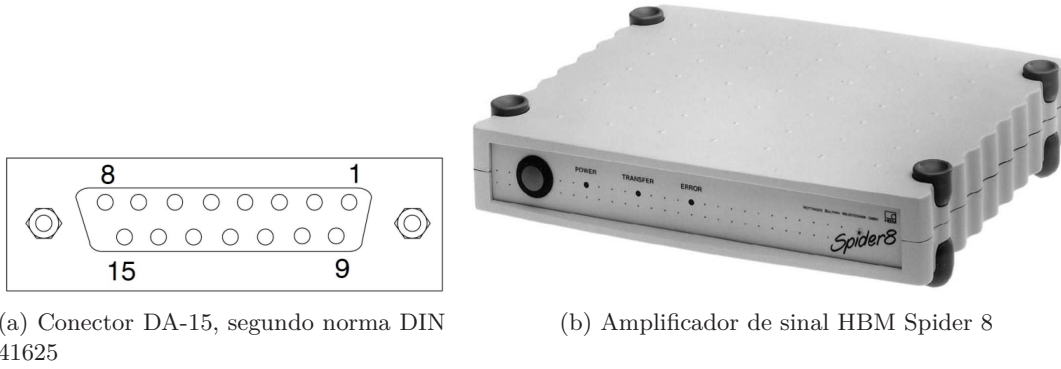


Figura 3.2: Ficha existente no hardware Spider 8

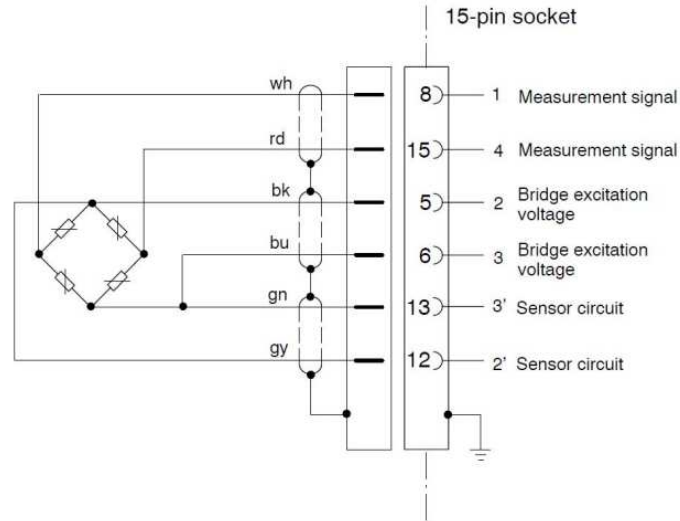


Figura 3.3: Ligação da Ponte de Wheatstone e o conector DA-15

algumas variações.

Optou-se depois por realizar ensaios “estáticos”, ou seja, seriam aplicadas sucessivamente cargas estáveis às células de carga durante 10 segundos. Os resultados foram muito mais credíveis, pois o comportamento das curvas foi o esperado tendo por base a folha técnica fornecida pela fabricante das células. Refira-se apenas ligeiras variações entre as células e nas curvas à tração e à compressão, sendo no final as curvas de calibração a usar as apresentadas na Figura 3.6, que são expressas pelas equações 3.1 à 3.4, com a carga  $P$  em  $kN$  e a relação de tensões  $V$  em  $mV/V$ .

- Célula de carga X à tração:

$$V = 0,1022P + 0,0189 \quad (3.1)$$

- Célula de carga X à compressão:

$$V = -0,1020P + 0,0175 \quad (3.2)$$





Figura 3.4: Ligações da ficha DA-15 e Célula de Carga

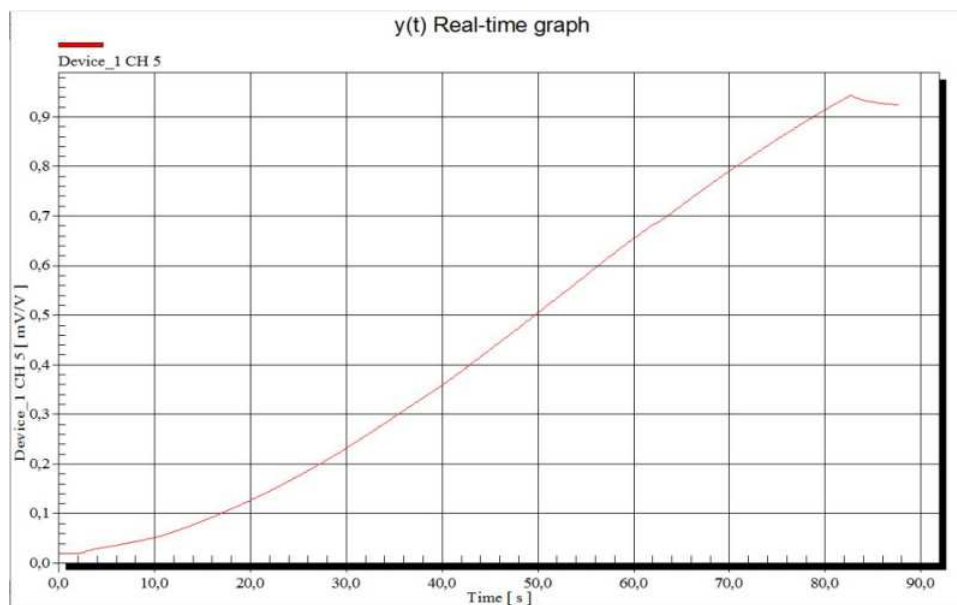


Figura 3.5: Exemplo dos resultados do ensaio obtidos no “catman 4.5”

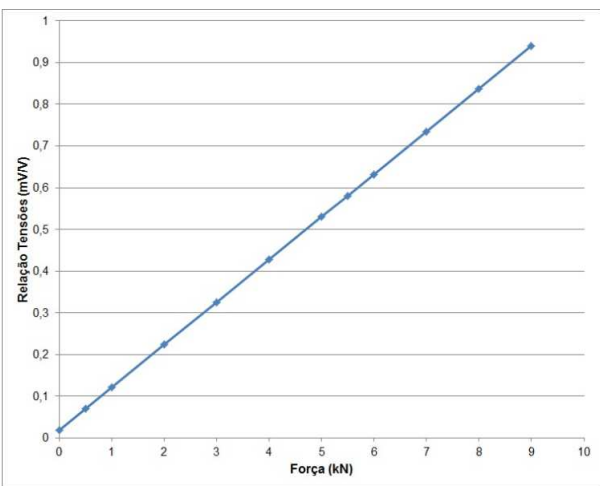
- Célula de carga Y à tração:

$$V = 0,1019P + 0,0241 \quad (3.3)$$

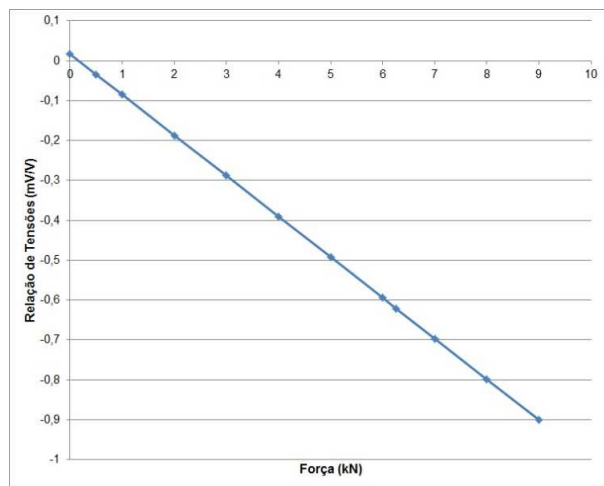
- Célula de carga Y à compressão:

$$V = -0,1018P + 0,0215 \quad (3.4)$$

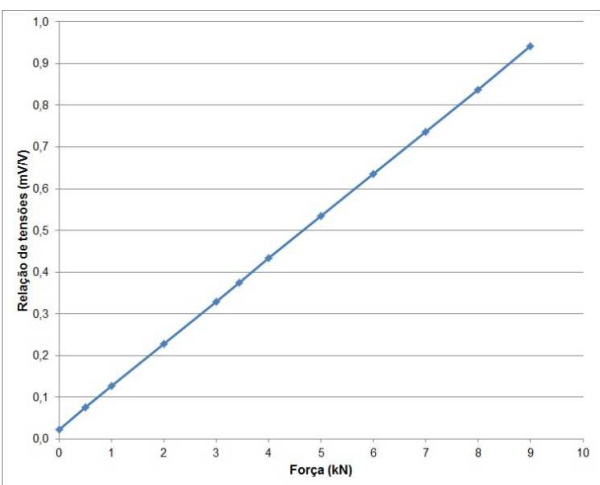
Naturalmente, uma análise mais atenta dos gráficos apresentados na Figura 3.6 mostra que, para uma posição de repouso, o zero da célula de carga se mantém, quer para tração, quer para compressão, aproximadamente  $0,018mV/V$  para a célula  $x$  e  $0,023mV/V$



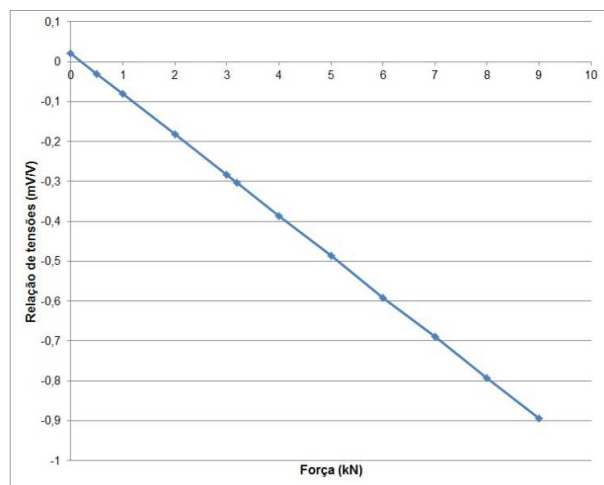
(a) Calibração à tração da célula de carga X



(b) Calibração à compressão da célula de carga X



(c) Calibração à tração da célula de carga Y



(d) Calibração à compressão da célula de carga Y

Figura 3.6: Calibração das células de carga

para a célula  $y$ . De facto, as pequenas diferenças no declive que se observam nas regressões lineares das equações 3.1 até 3.4 não são desprezáveis para pequenas variações de carga. Daí que tenham sido levadas em conta no tratamento de dados.

A conjugação das células de carga com o amplificador de sinal e o computador utilizado constituem o sistema de leitura e aquisição dos dados relativos à carga. A Figura 3.7 representa um esquema da ligação entre os diversos elementos para permitir a leitura das relações de tensões ao longo do tempo, e para estas poderem ser convertidas à posteriori em forças com as equações acima indicadas.

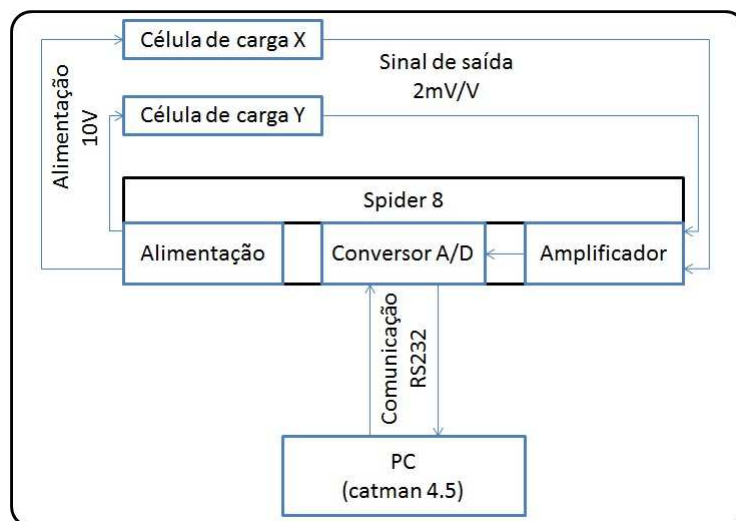


Figura 3.7: Fluxograma da ligação entre dispositivos do sistema de leitura de carga

É importante referir que os valores em  $mV/V$  dizem respeito às leituras feitas pelo *software* “catman 4.5”. É possível comprovar os resultados obtidos com base na ficha técnica do fabricante (A.1).

Sabendo que a ponte de *wheatstone* da célula de carga é alimentada pelo “spider 8” com 10V, significa que à saída da mesma, por exemplo, para os valores máximos apresentados na Figura 3.6, têm-se que  $0,95mV/V \times 10V = 9,5mV$  à carga de aproximadamente  $10kN$ . Este valor está correto, pois pelos dados do fabricante a célula de carga têm uma saída de  $2mV/V$  (A.1). Logo, para as duas toneladas nominais que são o limite da célula de carga, têm-se uma tensão de saída de  $20mV$ .

## 3.2 Vídeo-extensómetro

### 3.2.1 Vídeo-extensómetro, *software* e calibração

A utilização do vídeo extensómetro (Figura 3.8) era imprescindível para a realização dos ensaios pretendidos com a máquina projetada. Este componente consiste numa câmara que, associada a um *software*, e permite registar deslocamentos num eixo ou num plano.

Contudo, a máquina de ensaios biaxial possui um espaço limitado em termos de distância entre o plano do provete e o vídeo-extensómetro. Além disso, o vídeo-extensómetro só é funcional quando estiverem devidamente conciliadas as lentes, a distância de focagem e a luminosidade ambiente. Devido ao limitado espaço testaram-se várias soluções possíveis, tendo-se chegado a uma combinação válida de uma lente (Figura 3.9a) e um ampliador (Figura 3.9b), ficando assim um conjunto de componentes definidos para a distância disponível (Figura 3.9c).



Figura 3.8: Vídeo-extensómetro MESSPHYSIK ME 46NG



(a) Lente de distância mínima 0,5 m



(b) Ampliador 2x



(c) Montagem vídeo-extensómetro com lente e ampliador

Figura 3.9: Lente, ampliador e vídeo-extensómetro

O vídeo extensómetro é controlado por vários *software* conforme o tipo de medições que se pretendem efetuar. Neste trabalho optou-se pelo *Dotmeas*, que permite medir deslocamentos de pontos no plano de solicitação do provete.

O procedimento para a análise dos deslocamentos ao longo de um ensaio exige um conjunto de passos iniciais de cada vez que as condições do ensaios variam. Entenda-se por condições de ensaio a luminosidade, a distância da câmara, ou até pequenas variações na focagem da mesma. Considerando estes aspectos, ao iniciar o *Dotmeas* é necessário um procedimento de calibração com uma matriz de pontos conhecida (Figura 3.10a), onde a distância teórica entre pontos seria de 3mm por 3mm. Porém, a impressão dos pontos não é absolutamente igual em ambos os eixos, e foi por isso medida a microscópio (Figura 3.10c) que possui uma resolução de 0,001 mm. Verificou-se que a distância real da matriz era de 3,009mm para o eixo  $x$  e 3,012mm para o eixo  $y$ . Esta diferença pode ser tida em conta, pois o sensor CDD (*Charge Coupled Device*) utilizado pelo vídeo-

extensômetro possui uma matriz retangular, permitindo a alteração dos parâmetros de relação entre eixos de modo a obter-se o valor real. Isto é necessário porque o o *Dotmeas* apenas permite calibração num dos eixos (Figura 3.11). Também se teve em consideração a falta de circularidade da impressão dos pontos, notória ao microscópio. Contudo, o *Dotmeas* permite afinar a circularidade dos pontos e o seu diâmetro, sendo que quanto mais perfeitos forem os pontos a utilizar, menores serão as oscilações das medições em relação ao “ponto zero”. A calibração da câmara deve ser validada através de um ciclo de medições nos pontos do eixo perpendicular ao eixo de calibração. A média das variações desses pontos deve coincidir com o valor teórico.

Após a calibração, o equipamento fica pronto a ser utilizado para a mesma distância dos pontos em estudo e com as mesmas condições exteriores.



Figura 3.10: Matriz de calibração, provete de calibração e microscópio

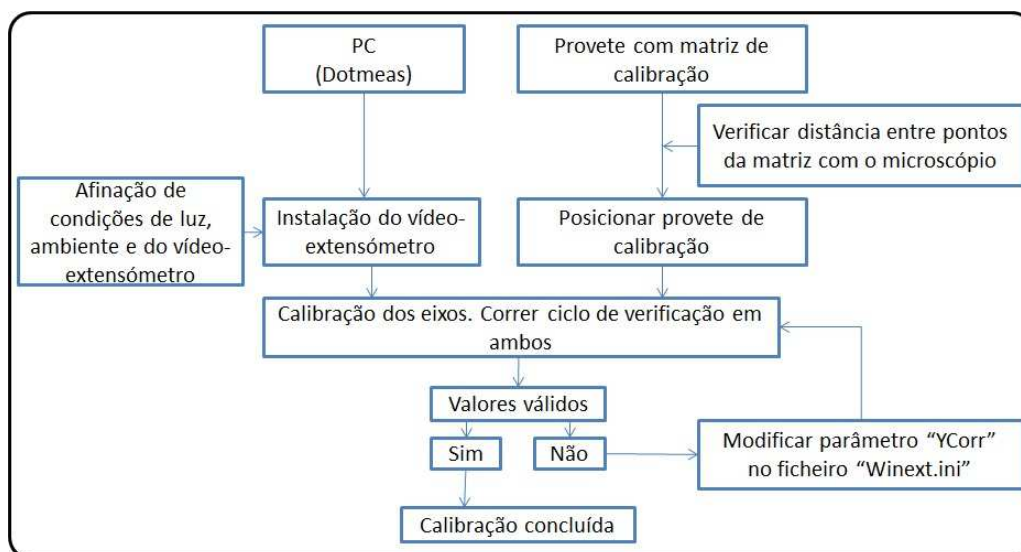


Figura 3.11: Fluxograma de calibração

### 3.2.2 Suporte e instalação

Seguidamente, foi necessário conceber um suporte que permitisse uma regulação em altura do vídeo-extensómetro, e que o mantivesse estável ao longo dos ensaios, tendo sempre em conta os elementos já existentes na máquina, o pouco espaço disponível, bem como a necessidade de manter os custos reduzidos. Nestas circunstâncias, optou-se pela maquinação de uma chapa de aço (Figura 3.12) com furos passantes  $\phi 18$  para parafusos M16 de fixação à base do dispositivo de ensaio biaxial. Um conjunto de porcas posicionadas entre a chapa e a base da máquina permitem a sua regulação em altura e a nivelção do sistema, sendo que a chapa de elevação está diretamente apoiada nas porcas. Esta chapa tem um rasgo maquinado no qual é apoiado o vídeo-extensómetro e uma chapa quinada a  $90^\circ$ , que é ligada uma peça de encosto daquele.

A instalação de todo o sistema está representada na Figura 3.13.

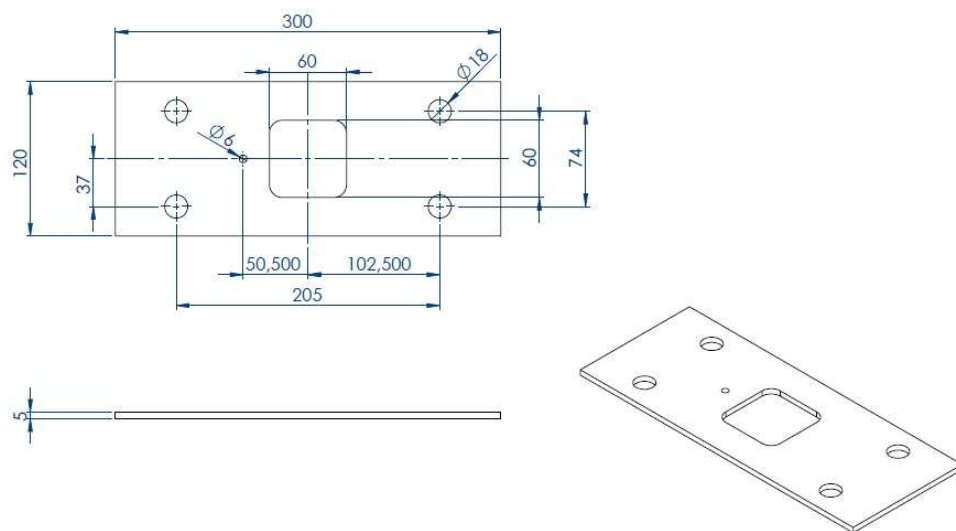


Figura 3.12: Placa de elevação do vídeo-extensómetro



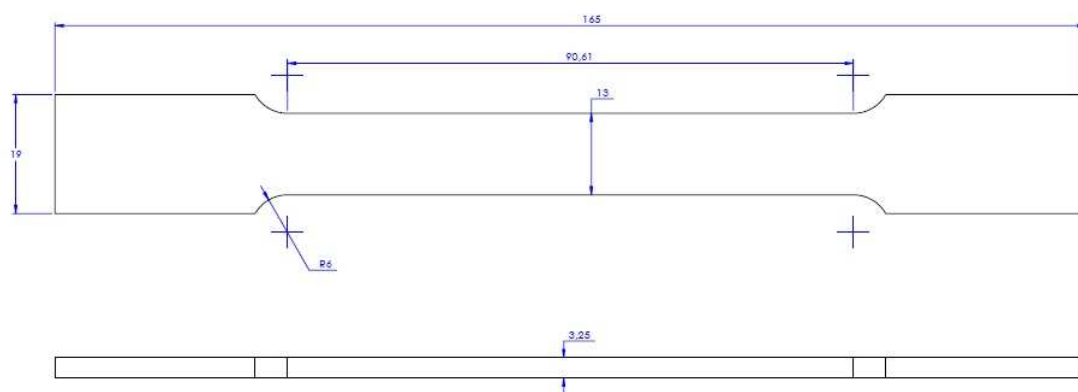
Figura 3.13: Montagem da interface vídeo-extensômetro máquina

### 3.3 Fabrico dos provetes

Usaram-se neste trabalho provetes de polipropileno (PP) (Figura 3.14) obtidos por injeção na máquina *INAUTOM D65* disponível no DEM-UA. Os provetes foram fabricados numa mesma série mantendo sempre as mesmas condições de processamento (tabela 3.1) de modo a uniformizar o mais possível as amostras.



(a) Provete de polipropileno injetado



(b) Desenho do provete e dimensões

Figura 3.14: Exemplar dos provetes utilizados e desenho com as dimensões gerais



Tabela 3.1: Condições de processamento dos provetes [13]. A zona 1 é a alimentação do material ao cilindro de plastificação, as zonas 2 a 4 estão nas mantas de aquecimento existentes ao longo desse cilindro, e a zona 5 situa-se no bico de injeção.

Definição Matweb	Definição Máquina	Condições de processamento °C	Utilizado °C
“Feed Temperature”	Temperatura Zona 1	180 - 210	195
“Rear Barrel Temperature”	Temperatura Zona 2	177 - 274	215
“Middle Barrel Temperature”	Temperatura Zona 3	191 - 274	220
“Front Barrel Temperature”	Temperatura Zona 4	199 - 274	225
“Nozzle Temperature”	Temperatura Zona 5	204 - 243	220
“Mold Temperature”	Temperatura do molde	5 - 80	40

### 3.4 Alterações em componentes mecânicos da máquina

O projeto inicial da máquina, pensado para provetes compósitos, não era adequado ao comprimento (165 mm) dos provetes poliméricos que se decidiu usar para a testar. Efetuou-se por isso uma alteração que consistiu na colocação em posições invertidas das peças de suporte dos rolamentos, ligadas ao bloco cruciforme (Figura 3.15) por parafusos. O afastamento ao centro do dispositivo diminuiu o suficiente para permitir tracionar os provetes poliméricos adotados. Esta alteração passou por criar novas furações concêntricas com as já existentes na peça, mas na face oposta.

Foi ainda necessário encontrar uma solução para aplicar cargas de compressão segundo o eixo perpendicular. A solução consistiu em substituir todo o sistema de tração por cunhas pelo representado pela Figura 3.16, no qual as cargas de compressão são aplicadas por peças de encontro ao provete. Este sistema possibilita a regulação ao longo do eixo para garantir que, no instante inicial do ensaio, a compressão será simétrica.

### 3.5 Ensaio: preparação e procedimento

Estando todo o *hardware* instalado, a preparação de um ensaio é um processo relativamente moroso que envolve uma série de etapas e procedimentos resumidos na Figura 3.17. Note-se que o fluxograma global daquela figura inclui os procedimentos de leitura de carga e calibração descritos nas Figuras 3.7 e 3.11, respetivamente, eles próprios bastante elaborados.



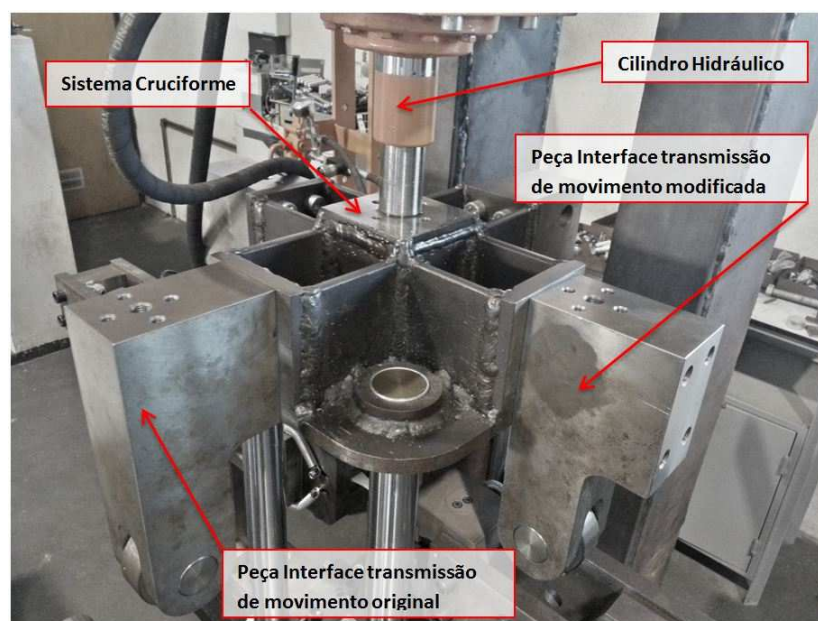


Figura 3.15: Sistema cruciforme móvel

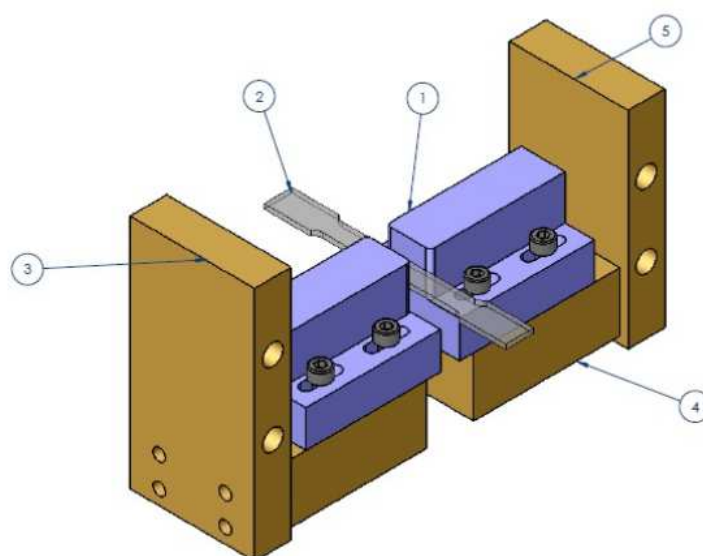


Figura 3.16: Modelação do sistema de compressão projetado. 1- Interface de compressão; 2- Provete; 3- Placa ligação ao carro com célula de carga; 4- Interface inferior; 5- Placa ligação ao carro sem célula de carga

Há, evidentemente, certos procedimentos específicos do tipo de provete ensaiado e da combinação de cargas usada. Por exemplo, os critérios de paragem do ensaio podem ser diversos, tais como as cargas estarem próximas das capacidades das células de carga, os deslocamentos ficarem fora do campo de medida do vídeo-extensómetro, as cargas baixarem devido à rotura do provete, entre outros.

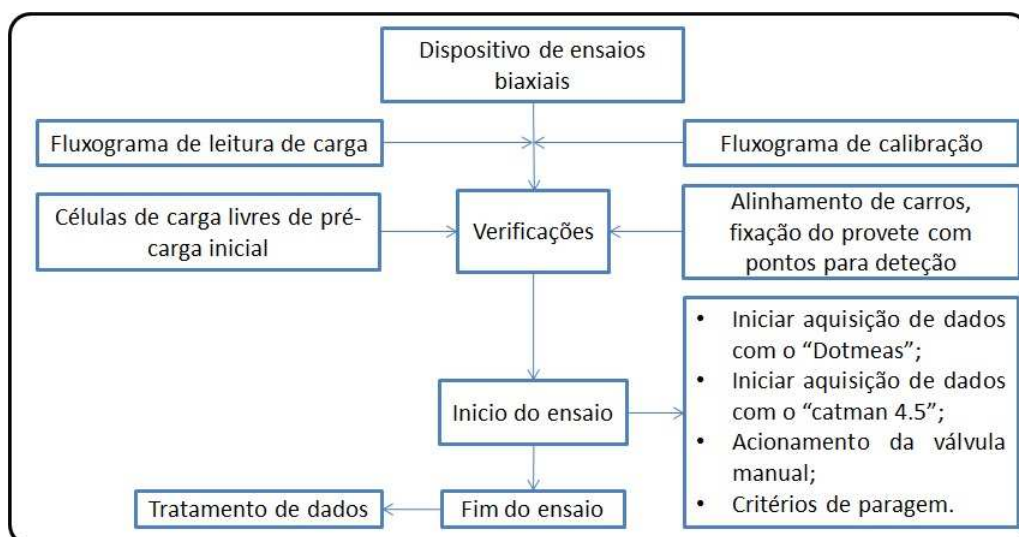


Figura 3.17: Fluxograma de procedimento de um ensaio experimental

## Capítulo 4

# Ensaaios Experimentais

### 4.1 Tratamento de dados

Durante um ensaio são gerados dois ficheiros independentes:

- um ficheiro proveniente do *Dotmeas*, que regista as coordenadas dos pontos em  $x$  e em  $y$ ;
- outro ficheiro obtido do programa *Catman 4.5*, que regista a relação em  $mV/V$  das células de carga, a converter posteriormente em carga através das equações de calibração definidas no capítulo 3.1.

Em ambos os casos a aquisição de dados é feita a intervalos de tempo especificados, tipicamente 0,3 a 0,5 segundos, dando origem a ficheiros bastante extensos.

Desenvolveu-se por isso uma *Macro de Excel* para cruzamento dos dados contidos nos dois ficheiros, operação esta que tem por base o intervalo de tempo de aquisição de dados. Daí o início e a finalização do registo de dados serem pontos de elevada importância no ensaio. No cruzamento de dados a referida *Macro* utiliza os tempos obtidos pelo *Catman 4.5*, pois estes são mais precisos devido ao facto do processamento e arquivo das variáveis ser efetuado pelo amplificador de sinal e não pelo computador. No final, a *Macro* permite associar os deslocamentos e cargas medidas a cada instante de tempo, dando origem a um conjunto de dados que pode depois ser convertido em curvas tensões-deformações. O fluxograma da 4.1 resume esta fase do processo de tratamento de dados.

### 4.2 Ensaaios uniaxiais de validação do dispositivo

Tratando-se de um novo equipamento de ensaio, era fundamental proceder à sua validação. Para isso recorreu-se a ensaios de tração uniaxial de provetes de PP mencionados no capítulo 3.3. Os objetivos da validação eram verificar:

- a equivalência dos sistemas de carregamento dos eixos  $x$  e  $y$ ;
- a ausência de deformações espúrias nos eixos livres perante carregamento uniaxial;
- a concordância com os resultados obtidos na máquina universal de ensaios Shimadzu 50kN-AG.

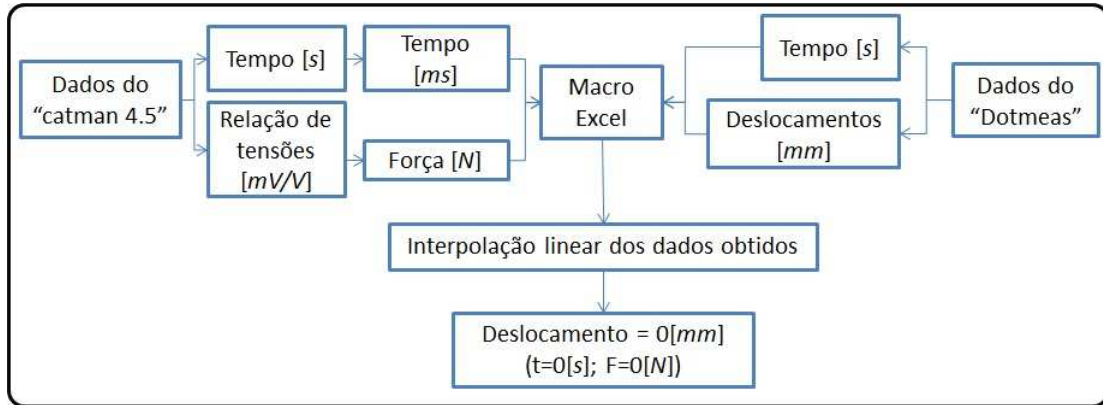


Figura 4.1: Tratamento de dados

Nos ensaios, que foram realizados a  $2\text{mm}/\text{min}$ , usou-se para medição das deformações nas duas direções um conjunto de quatro pontos dispostos em losango na zona central do provete 4.2, sendo a distância inicial entre pontos  $L_0 = 5\text{ mm}$ . Não obstante, em alguns ensaios realizados na “Shimadzu” recorreu-se a outro método de medição de deformações, baseado em marcas óticas retangulares e iluminação por trás do provete. Neste caso o objetivo foi avaliar o método de medição das deformações baseado em pontos. Relativamente aos ensaios efetuados na “Shimadzu”, usou-se uma célula de carga com  $1\text{ kN}$  e as amarras em cunha disponibilizadas pelo próprio fornecedor. Por seu turno, no dispositivo biaxial seguiram-se os procedimentos estabelecidos na secção 3.5. O tratamento dos resultados de carga  $P$  e distâncias  $L_x$  e  $L_y$  entre pontos medidas pelo vídeo-extensómetro consistiu em calcular as tensões,

$$\sigma = \frac{P}{A} \quad (4.1)$$

e as deformações,

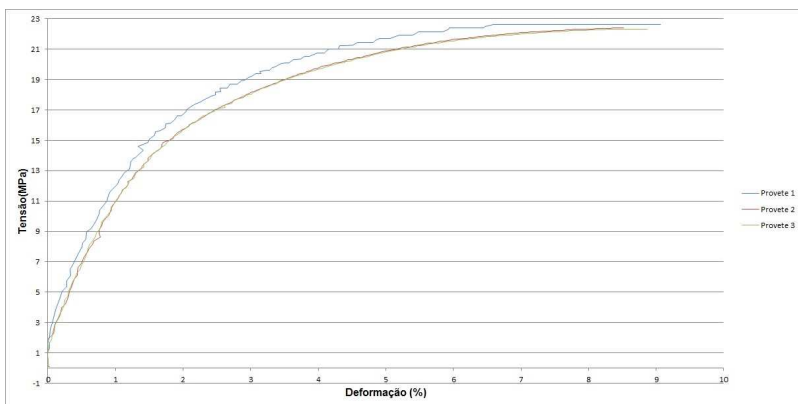
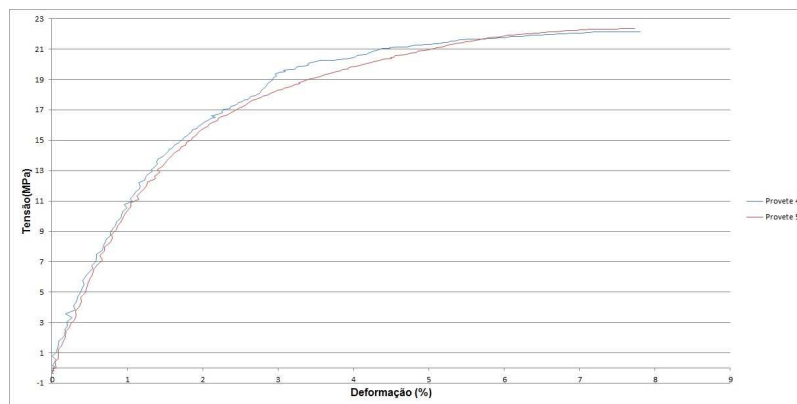
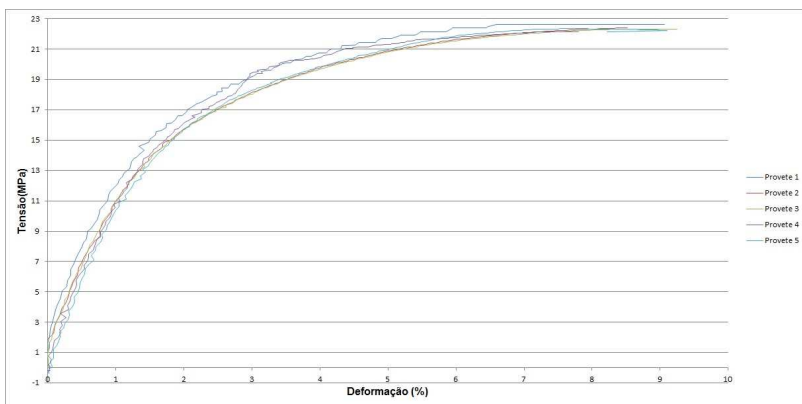
$$\varepsilon_x = \frac{L_x - L_{x,0}}{L_{x,0}}, \varepsilon_y = \frac{L_y - L_{y,0}}{L_{y,0}} \quad (4.2)$$

Figura 4.2: Distância entre pontos  $L_0=5\text{mm}$ 

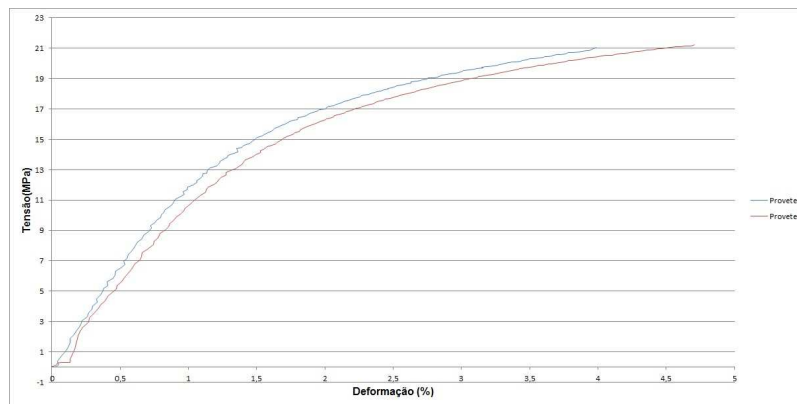
A semelhança das curvas tensão-deformação apresentadas nas Figuras 4.3 e 4.4 demonstra claramente a equivalência dos eixos  $x$  e  $y$  do dispositivo biaxial, e valida-o por

referência à “Shimadzu”. Há, obviamente, algumas diferenças entre as várias curvas, mas estas diferenças resultam da natural dispersão estatística de propriedades mecânicas do material ensaiado. De referir ainda que o método de medição de deformações alternativo - curvas assinaladas com a legenda “sombra E1 ... E3” na Figura 4.4 - deu resultados semelhantes ao da medição entre pontos, reforçando a validade da metodologia de ensaio biaxial desenvolvida.

Finalmente as Figuras 4.5 e 4.6 mostram as deformações no eixo livre em função das deformações no eixo da solicitação. Verifica-se que as deformações no eixo livre são “iguais” em  $x$  e em  $y$  e às que foram medidas na “Shimadzu”. Trata-se, portanto, de deformações que resultam das contrações de Poisson, revelando a ausência de deformações espúrias no dispositivo biaxial.

(a) Repetibilidade do eixo  $x$  solicitado à tração(b) Repetibilidade do eixo  $y$  solicitado à tração

(c) Similaridade de eixos quando solicitados à tração



(d) Ensaio de referência realizados na "Shimadzu"

Figura 4.3: Curvas tensão-deformação medidas em ensaios de tração realizados no dispositivo biaxial e na "Shimadzu"

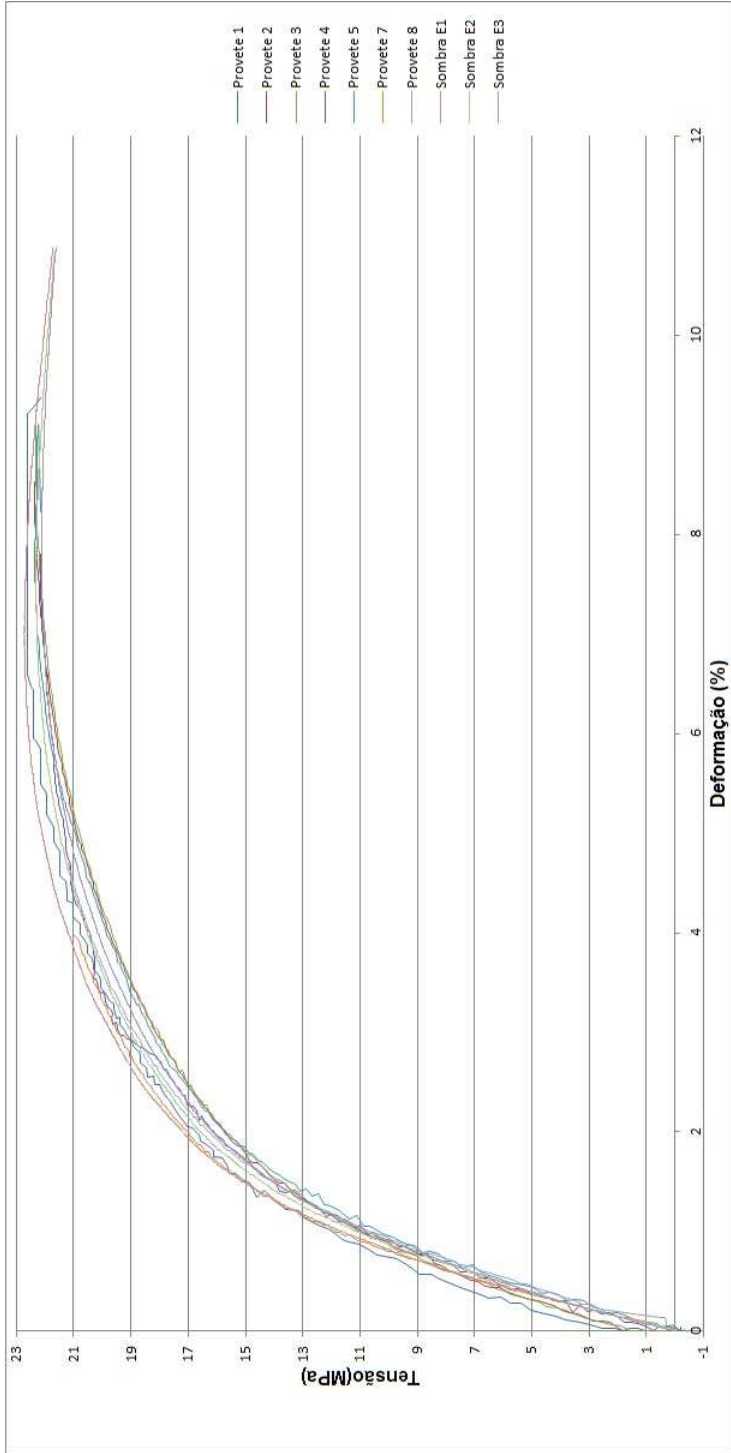
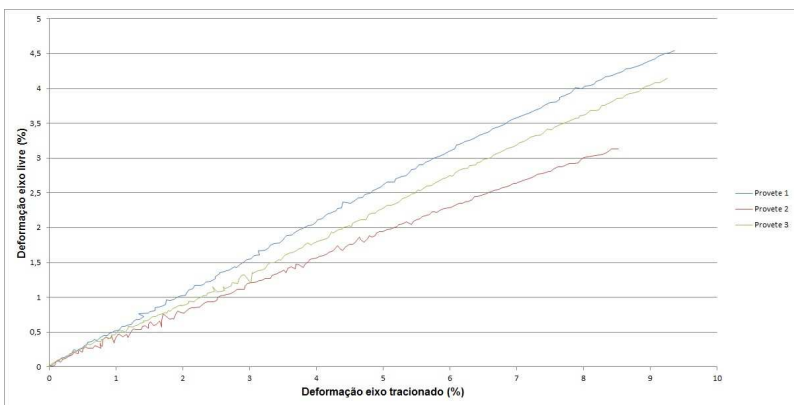
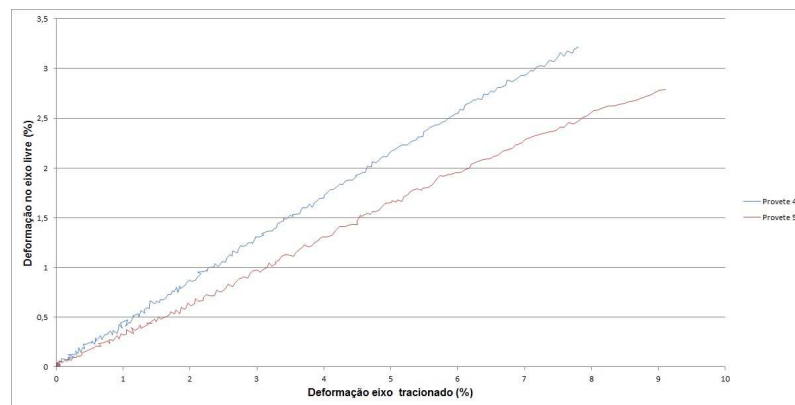
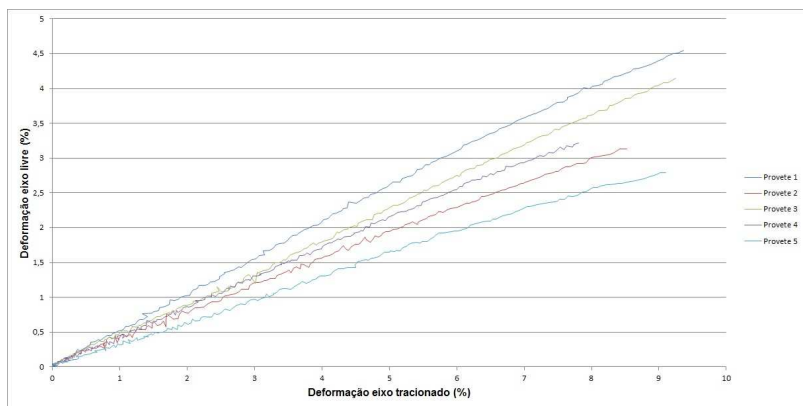
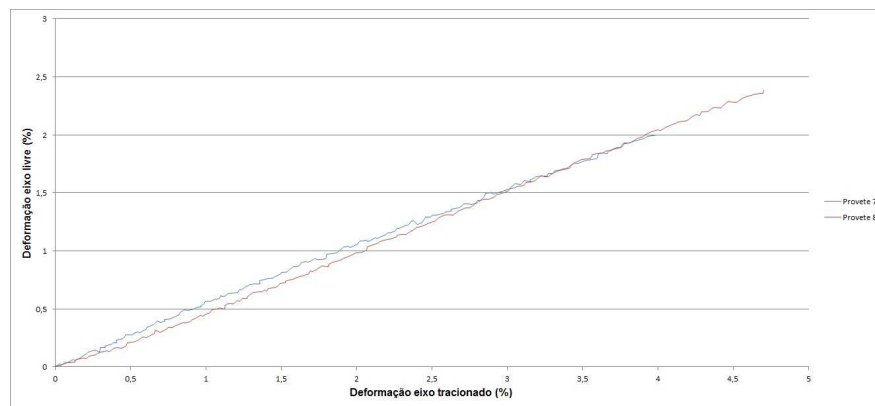


Figura 4.4: Comparação de todas as curvas tensão-deformação da Figura 4.3

(a) Repetibilidade do eixo  $y$  sem carga aplicada(b) Repetibilidade do eixo  $x$  sem carga aplicada

(c) Similaridade de eixos na direção perpendicular à da carga aplicada



(d) Ensaio de referência realizado na "Shimadzu"

Figura 4.5: Curvas deformação no eixo livre - deformação no eixo tracionado medidas em ensaios de tração realizados no dispositivo biaxial e na "Shimadzu"



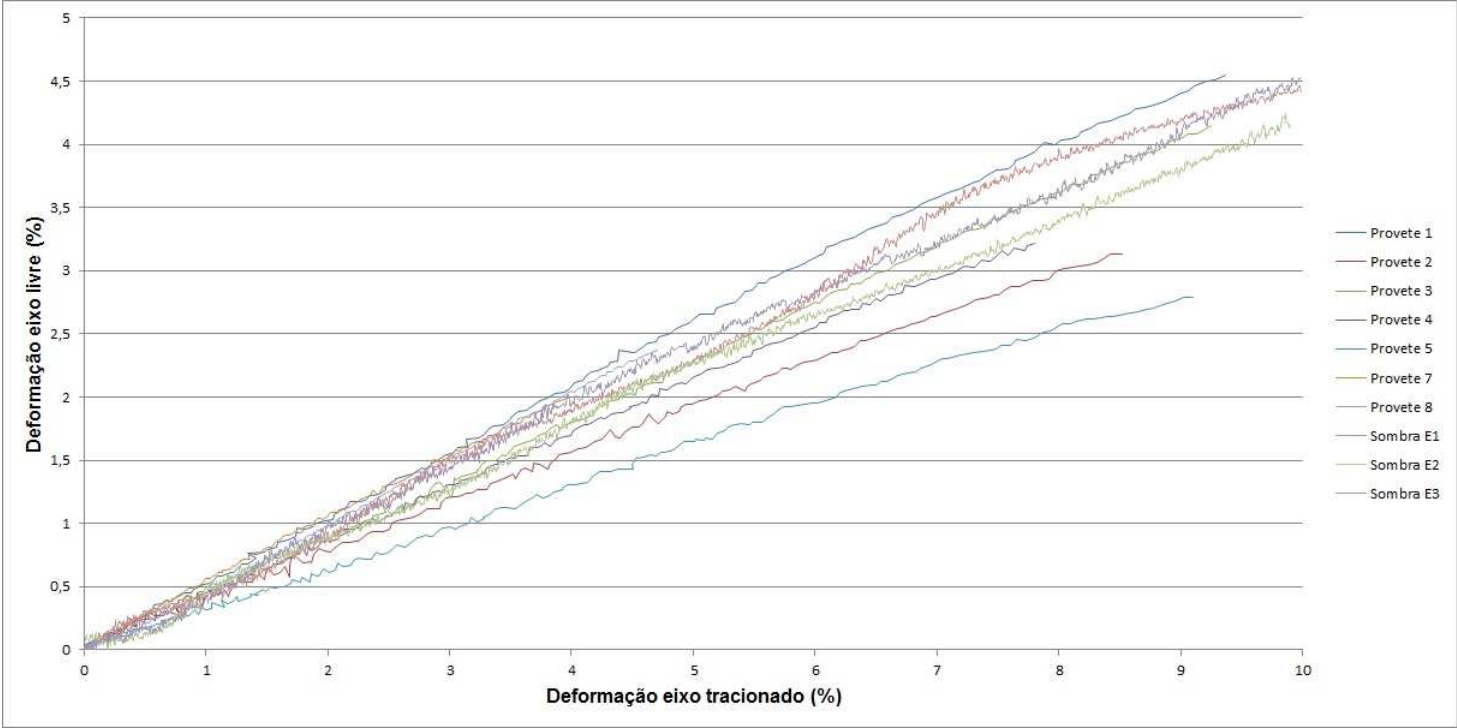


Figura 4.6: Comparação de todas as curvas deformação no eixo livre - deformação no eixo tracionado da Figura 4.5

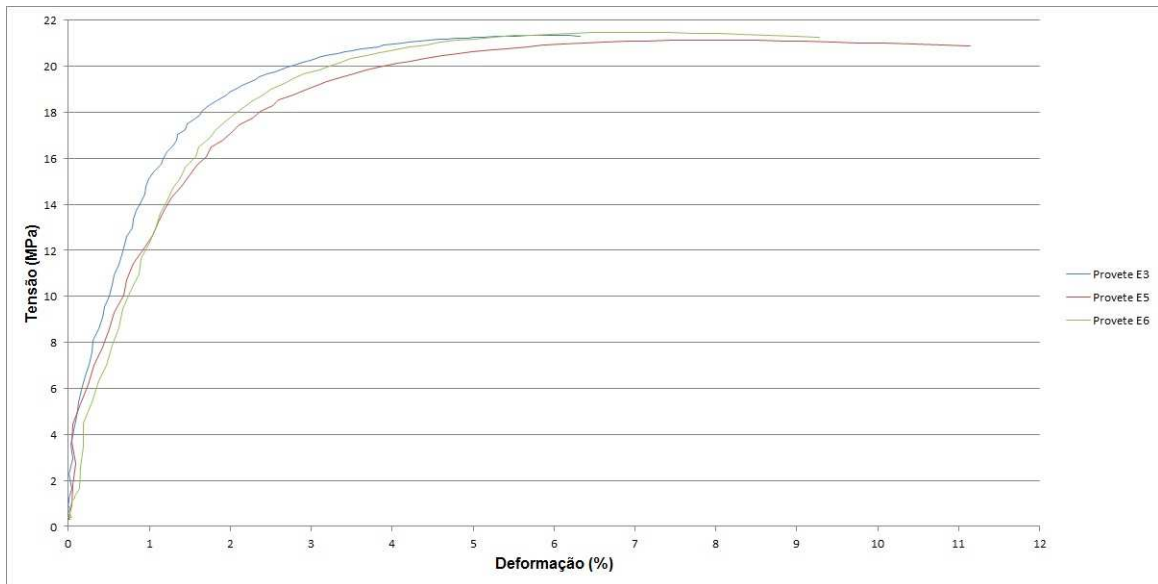
### 4.3 Ensaaios biaxiais

Tendo procedido às verificações do dispositivo biaxial através dos ensaios de tração uniaxial, importava realizar ensaios verdadeiramente biaxiais para prosseguir a avaliação do funcionamento do dispositivo e, eventualmente, afinar os procedimentos de ensaio desenvolvidos. Nesse sentido, realizaram-se ensaios biaxiais no mesmo tipo de provetes, sendo estes tracionados pela célula  $x$ , que estará sujeita à compressão, e comprimido pela célula  $y$ , sujeita à tração. Visto que as cunhas aplicadas não eram iguais em ambos os eixos, ou seja,  $25^\circ$  no caso do eixo solicitado à tração e  $11^\circ$  no eixo solicitado à compressão, as velocidades de ensaio foram de  $2\text{mm}/\text{min}$  e de  $0,834\text{mm}/\text{min}$ , respetivamente.

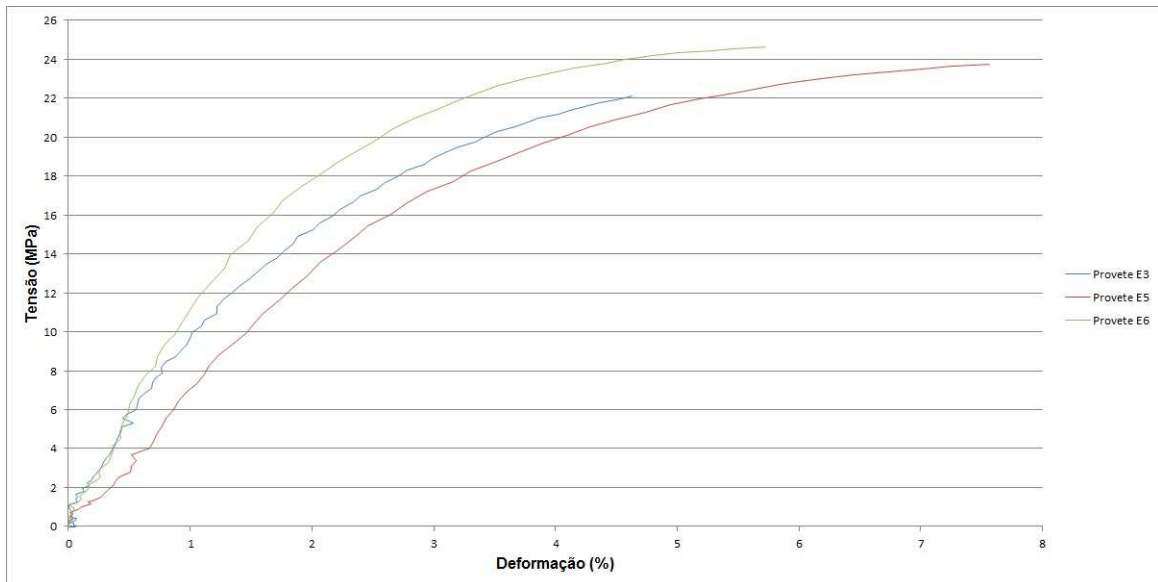
Após alguns ensaios obtiveram-se as curvas tensão-deformação nos dois eixos representadas na Figura 4.7. Por seu turno, a Figura 4.8 mostra fotografias de provetes após os ensaios, onde se observa que a zona danificada foi, efetivamente, a região que foi sujeita ao estado de tensão biaxial.

As tensões máximas atingidas neste ensaios (Figura 4.7) são claramente consistentes com as tensões de rotura medidas nos ensaios de tração (ver secção 4.2). Todavia, a interpretação dos resultados ao nível do comportamento do material terá que ser feita em trabalhos futuros que envolvam ensaios de compressão uniaxial, ensaios biaxiais sob várias combinações de tensões e análises por elementos finitos.

Este trabalho incidiu sobre o funcionamento do dispositivo que, como já foi referido, dá pouca acessibilidade aos componentes, inconveniente a que o sistema de compressão não foi exceção. Não obstante, os ensaios biaxiais revelaram uma importante dificuldade: garantir a atuação simultânea nos quatro pontos de carregamento dos provetes, aspeto fundamental para se obter os resultados pretendidos. A não verificar-se esta condição, poderia acontecer que o carregamento segundo um eixo só se iniciasse quando o provete estivesse já sob uma carga axial apreciável segundo o outro eixo. Logo, para garantir a validade dos resultados, há que acrescentar aos fluxogramas já apresentados mais um passo, que consiste precisamente em posicionar o provete e os sistemas de amarração de modo a conseguir contacto inicial sem carga em todos os pontos. No caso dos ensaios biaxiais efetuados, isso foi conseguido graças a afinação permitida pelo sistema de compressão



(a) Deformações - eixo sujeito à tração



(b) Deformações - eixo sujeito à compressão

Figura 4.7: Curvas tensão-deformação de provetes sujeitos a ensaio biaxial

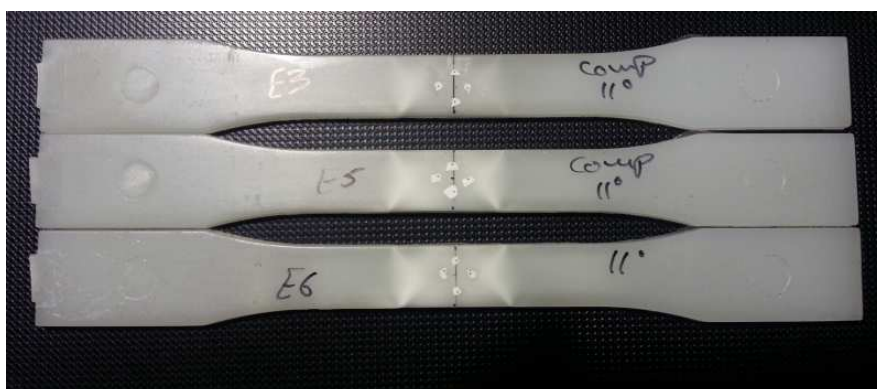


Figura 4.8: Fotografias de provetes sujeitos a ensaios biaxiais

## Capítulo 5

# Conclusões e Trabalhos futuros

Este trabalho permitiu adquirir um conhecimento aprofundado das dificuldades na realização de ensaios biaxiais, mas também da importância de que se revestem esses ensaios. Do trabalho realizado à volta do dispositivo biaxial previamente desenvolvido no DEM-UA conclui-se principalmente que:

- Os sistemas de tração e de compressão concebidos garantiram a repetibilidade e a “igualdade” dos eixos  $x$  e  $y$ , tendo ambos os eixos sido validados através da comparação de resultados de ensaios uniaxiais de uma máquina universal de ensaios.
- Apesar das dificuldades ao nível da falta de espaço, calibração e medição de deformações entre pontos, foi possível aplicar com sucesso o vídeo-extensómetro ao dispositivo biaxial.
- O *software* elaborado foi capaz de combinar corretamente os dados provenientes das células de carga e do vídeo-extensómetro.
- Os procedimentos de preparação e de realização de ensaios desenvolvidos permitem atingir resultados válidos.

Apesar dos progressos conseguidos, é evidente que há melhorias a fazer no dispositivo e nos procedimentos em trabalhos futuros, entre as quais se destacam:

- Fabrico de mordentes de diferentes tamanhos que permitam albergar diferentes espessuras de provetes, pois os existentes exigem a utilização de espaçadores para se atingir a compressão necessária para evitar escorregamento do provete;
- Criação ambiente de iluminação estável de modo a uniformizar e facilitar a calibração e focagem do vídeo-extensómetro;
- Desenvolver um processo de obtenção dos pontos de referência para medição de deformações que resolva as dificuldades encontradas ao nível do diâmetro e circularidade.
- Alterar a fixação do braço de transferência de carga, bastante pesado, para facilitar a sua movimentação aquando do ajuste a provetes de diferentes dimensões

Finalmente, há que aplicar o dispositivo à sua finalidade principal, que é o estudo do comportamento mecânico de materiais, especialmente laminados compósitos.



## Apêndice A

## Anexos A

Certificate of Calibration		
Modle	ST-7	
Capacity	2T	
Serial No	09050604	
Output	1.9997	mv/v
Zero	( 2	% of Full Seale
Creep(30min)	( 0.02	% of Full Seale
Non-linearity	( 0.02	% of Full Seale
Hysteresis	( 0.02	% of Full Seale
Repeataility	( 0.02	% of Full Seale
Temperature effect on Output	( 20	ppm/°C of Applied Load
Temperature effect on Zero	( 20	ppm/°C of Applied Load
Operating Temperature Range	-40°C to 80°C	
Compensated Temperature Range	-10°C to 40°C	
Safe overload	1.5×Capacity	
Input Impedance	385±3	ohms
Output Impedance	350±2	ohms
Insulation Resistance	>5000	Meg-ohme
Recommended Excitation	10VDC/AC	
Maximum Excitation	20VDC/AC	
Color code:		
Red	+Input	
Black	-Input	
Green	+Output	
White	-Output	

Vera-Add

*Vera-Ado*

Inspector

Date: 2009. 05. 06

Figura A.1: Informação técnica da célula de carga cedida pelo fabricante

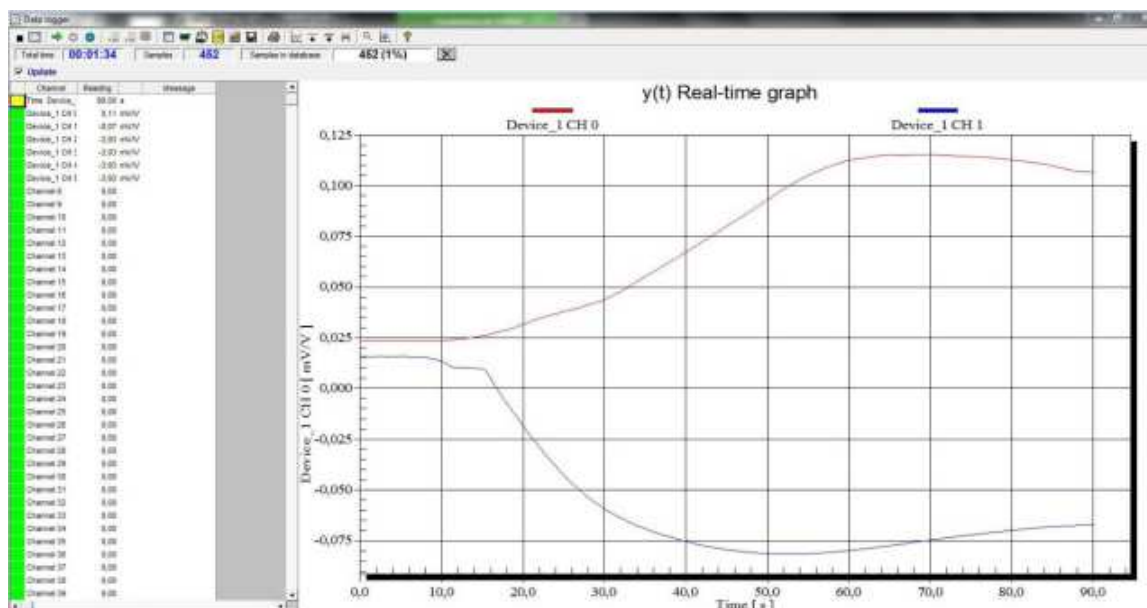


Figura A.2: Gráfico do ensaio biaxial tração/compressão retirado do “Catman 4.5”

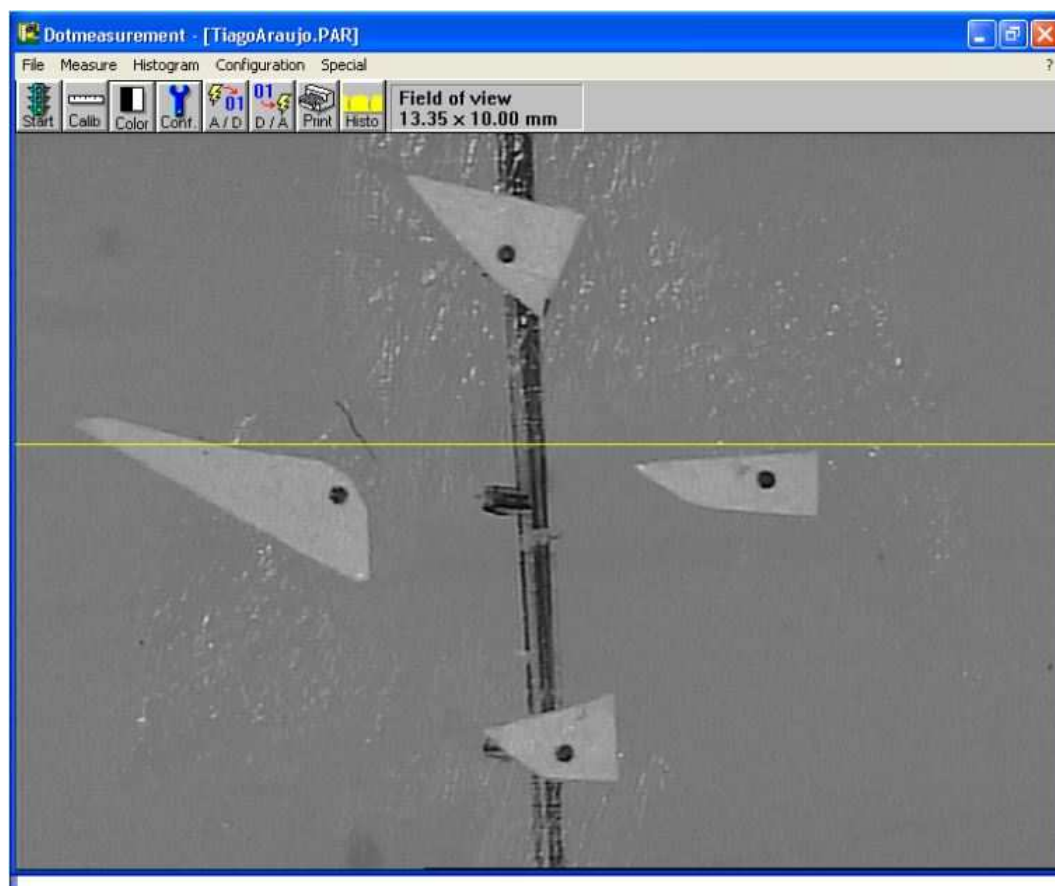


Figura A.3: Exemplo dos 4 pontos colocados no provete para um ensaio



**Apêndice B**

**Anexos B**

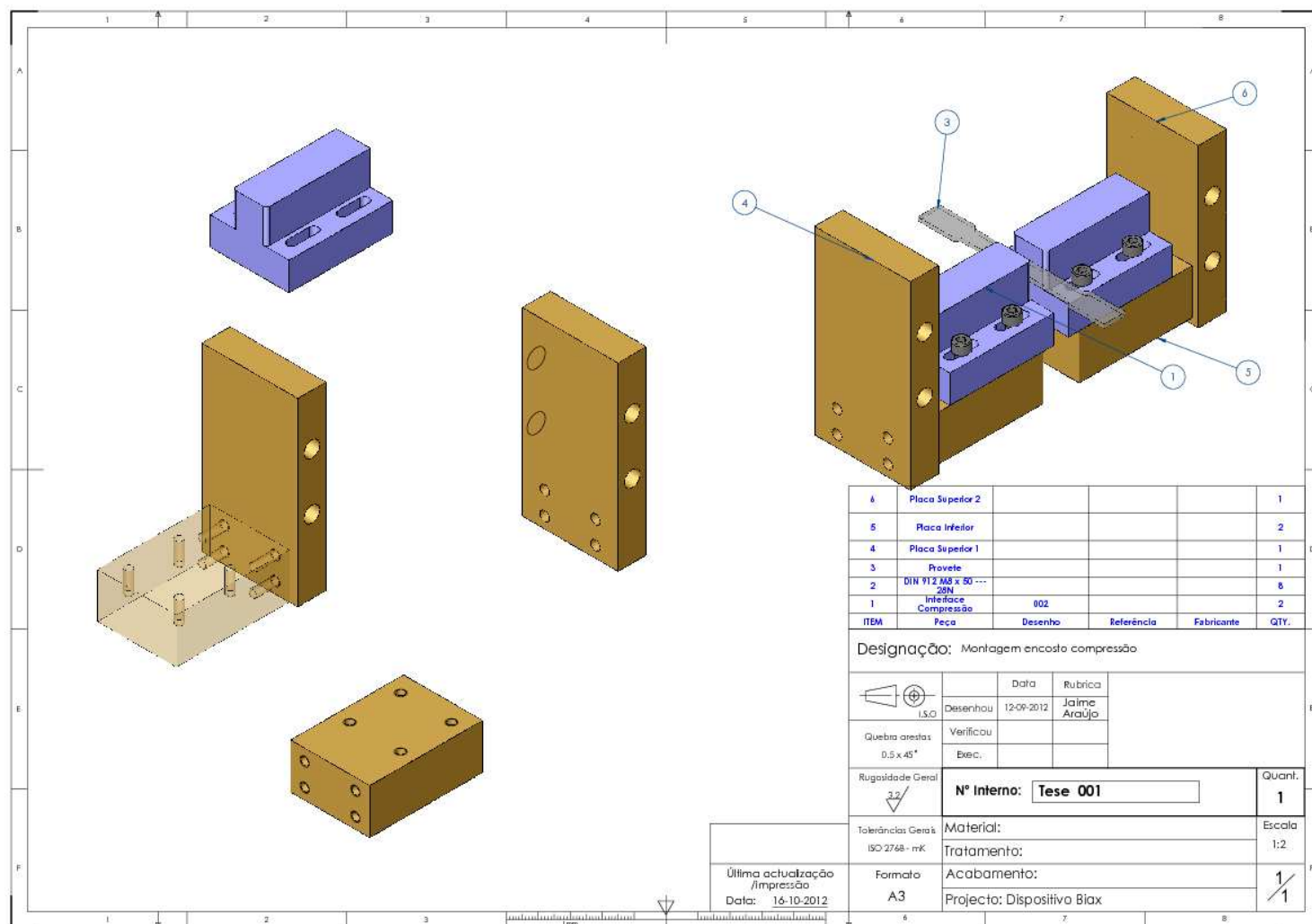


Figura B.1: Identificação e montagem dos componentes do sistema de compressão

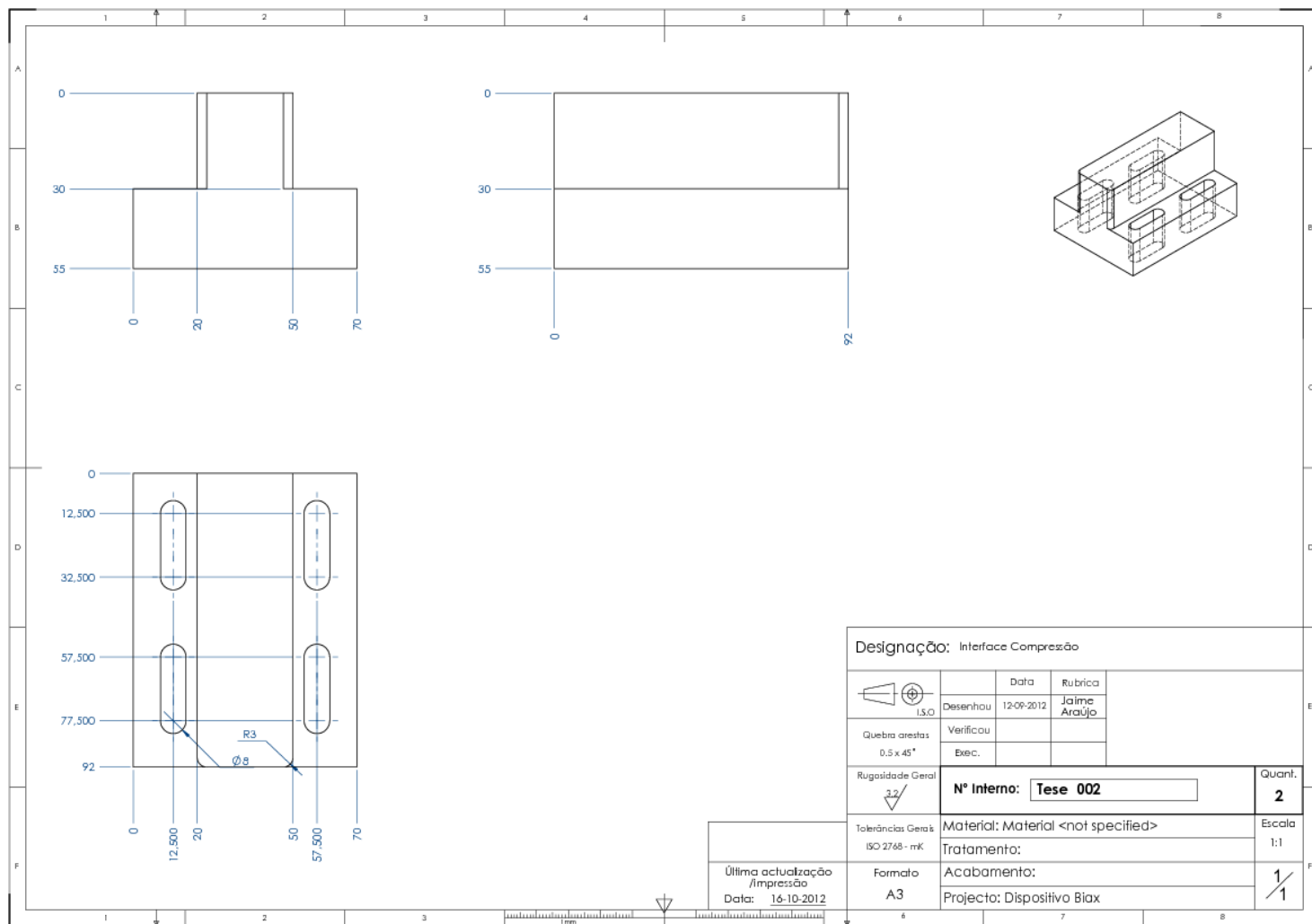


Figura B.2: Peça do sistema de compressão que contata com o provete

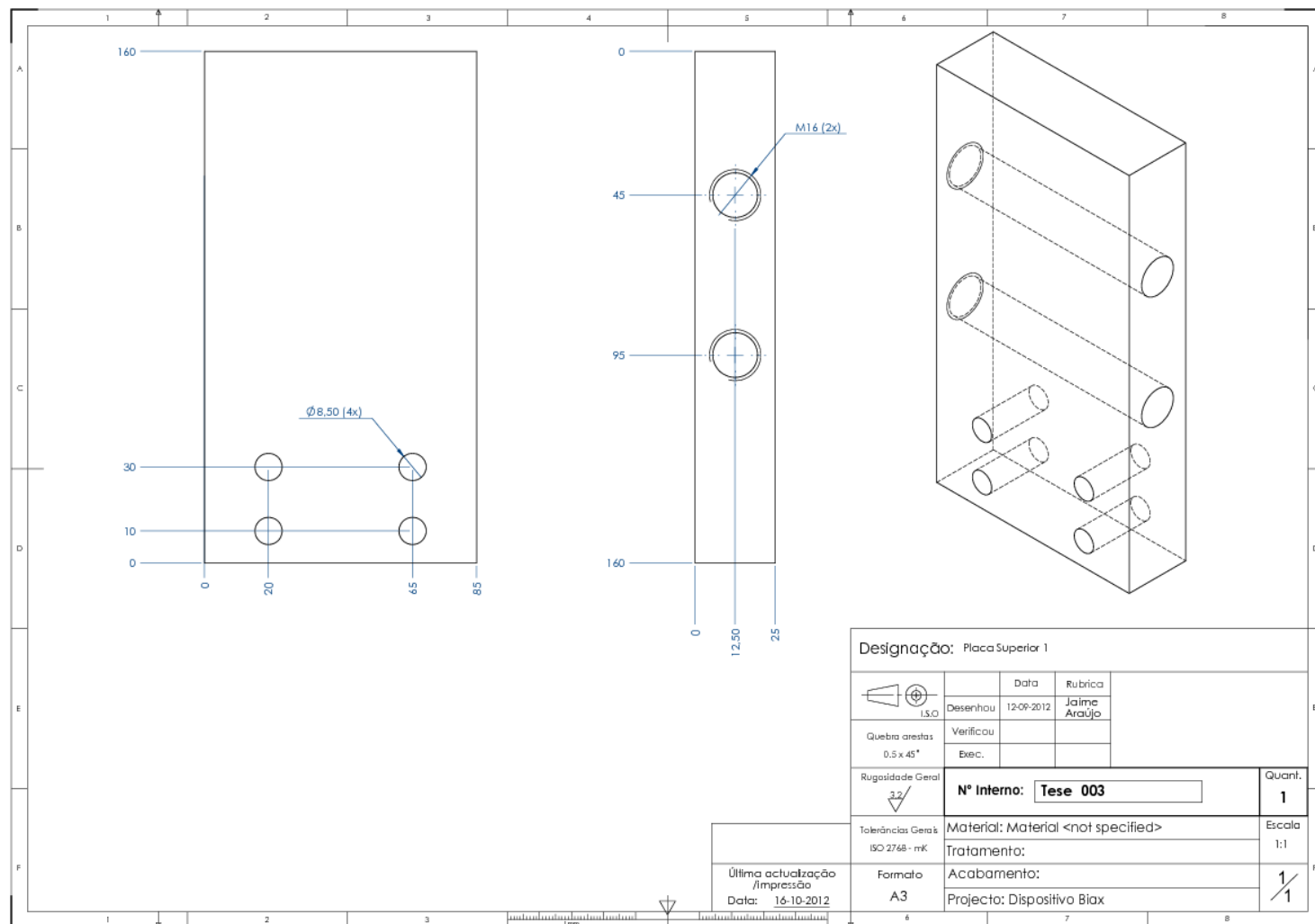


Figura B.3: Placa superior do sistema de compressão do braço com célula de carga

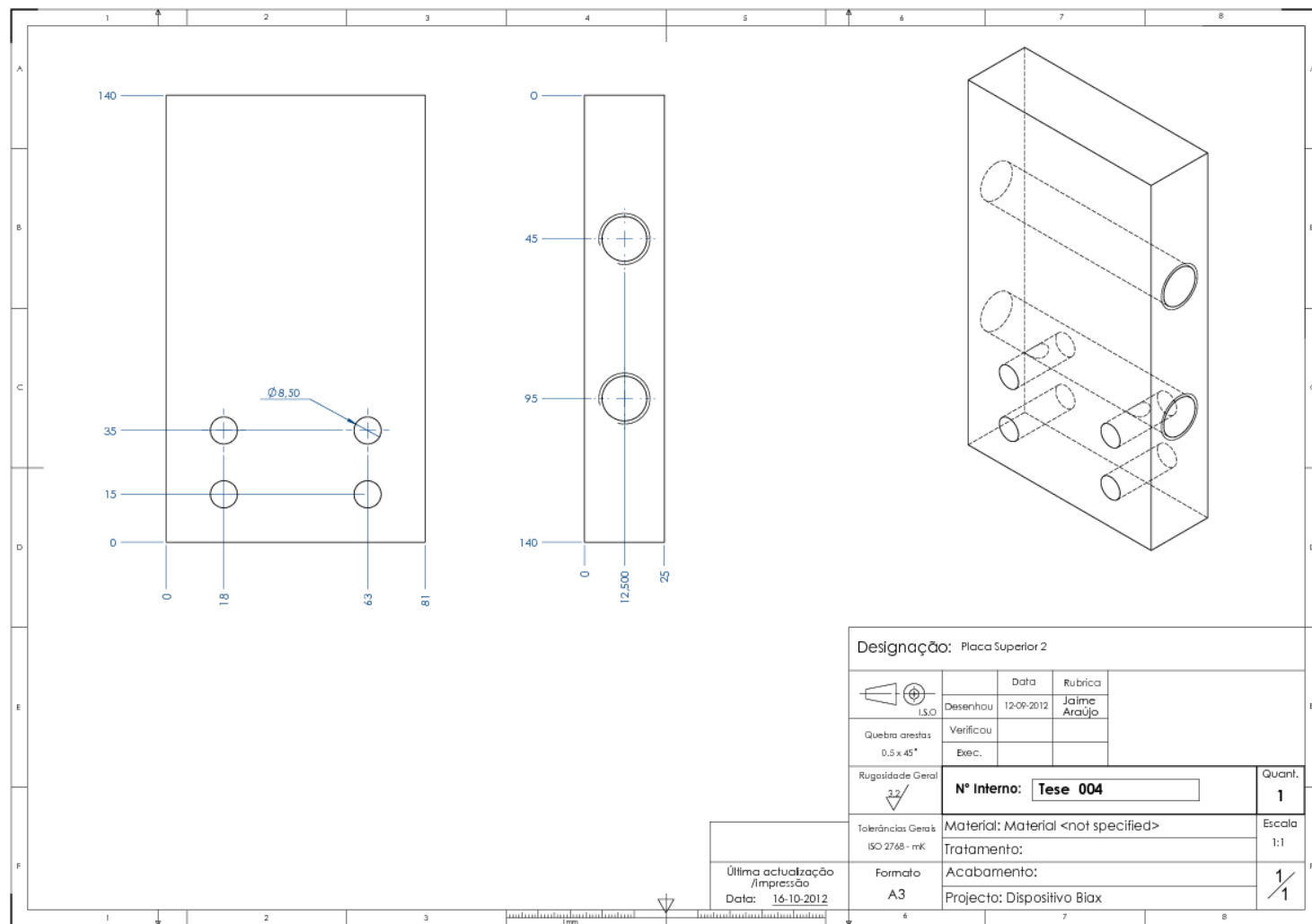


Figura B.4: Placa superior do sistema de compressão do braço sem célula de carga

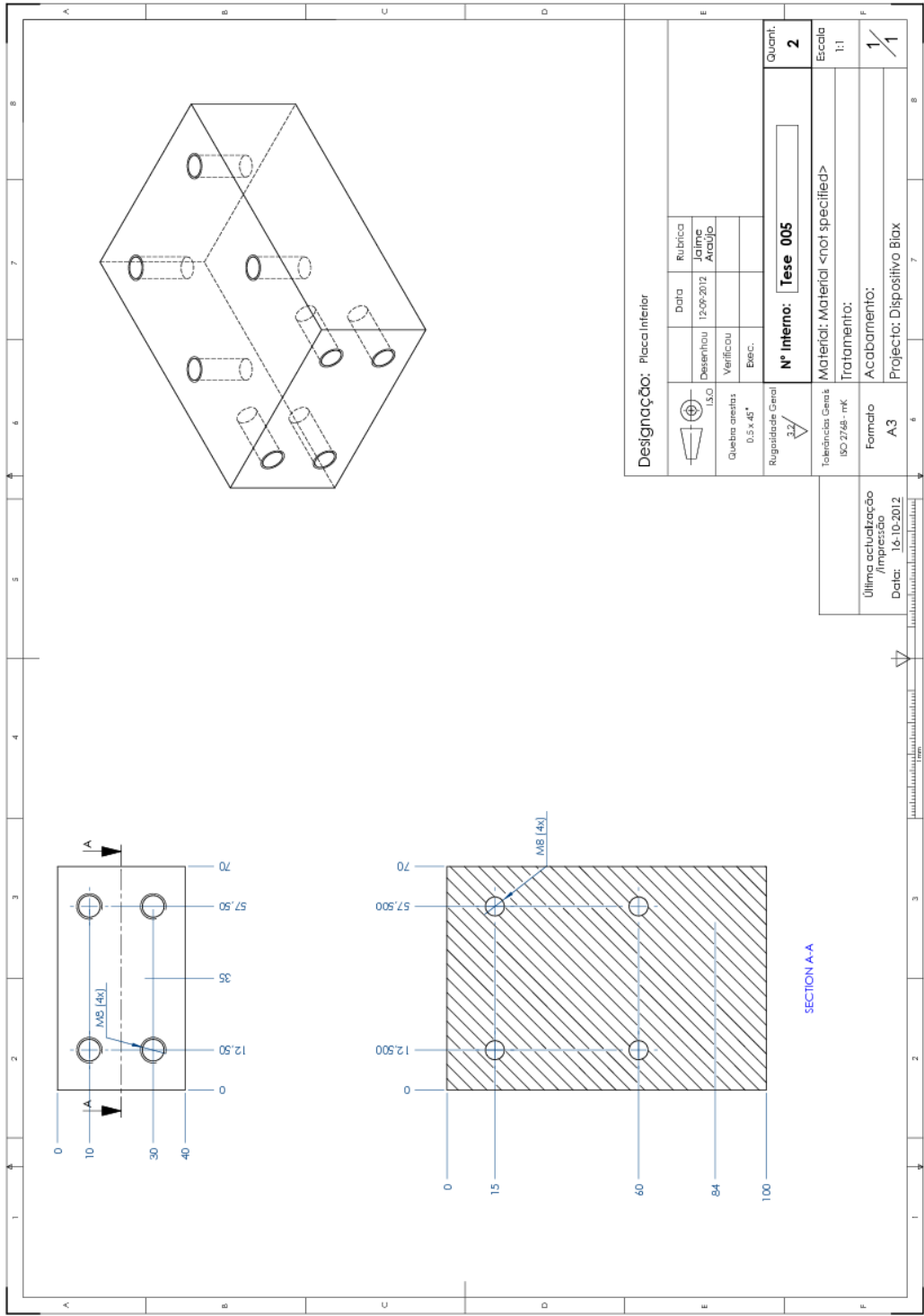


Figura B.5: Placa inferior do sistema de compressão

# Bibliografia

- [1] de Moura MFS, de Moraes AB, de Magalhães AG. Materiais compósitos: materiais, fabrico e comportamento mecânico. Publindústria; 2009.
- [2] Caber. Mechanical Testing; 2012. Disponível na Internet: <http://goo.gl/TSXmY> [Citado em 17.10.2012].
- [3] com A. Strain gauges; 2013. Disponível na Internet: <http://goo.gl/DRQ1ea>.
- [4] Inhabitat L. Siemens Creates the World's Largest Turbine Blades for New UK Wind Farm!; 2012. Disponível na Internet: <http://goo.gl/NTaLG> [Citado em 20 de Setembro de 2012].
- [5] Smits A, Ramault C, Makris A, Hemelrijck DV, Clarke A, Williamson C, et al. A Review of Biaxial Test Methods for Composites. *Biaxial Testing*. 2007;35:933–934.
- [6] Smits A, Hemelrijck DV, Philippidis TP, Cardon A. Design of a cruciform specimen for biaxial testing of fiber reinforced composite laminates. *Composites Science and Technology*. 2006;66:964–975.
- [7] Shiratori E, Ikegame K. A New Biaxial Tensile Testing Machine with Flat Specimen. *Bul Tokyo Inst of Tech*. 1967;82:105–118.
- [8] Pascoe KJ, de Villiers JWR. Low Cycle Fatigue of Steels Under Biaxial Straining. *J Strain Analysis*. 1967;2:117–126.
- [9] Parson MW, Pascoe KJ. Development of a Biaxial Fatigue Testing Rig. *J Strain Analysis*. 1975;10:1–9.
- [10] Makinde A, Thibodeau L, Neale KW. Development of an Apparatus for Biaxial Testing Using Cruciform Specimens. *Experimental Mechanics*. 1992;32:138–144.
- [11] Boehler JP, Demmerle S, Koss S. A New Direct Biaxial testing Machine for Anisotropic Materials. *Experimental Mechanics*. 1994;34:1–9.
- [12] Kuwabara T, Ikeda S, Kuroda K. Measurement and analysis of differential work hardening in cold rolled steel sheet under biaxial tension. *J Mater Process Technol*. 1998;80-81:517–523.
- [13] MatWeb L. Overview of materials for Polypropylene, Molded; 2012. Disponível na Internet: <http://goo.gl/xI0i2> [Citado em 20 de Setembro de 2012].